

**"ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ"
(ИНМАШ-2017)**

**VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ**

**"INNOVATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING"
(ISPCIME-2017)**

**VIII INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL
CONFERENCE**

The background of the entire page is a composite image. At the top, a large, detailed view of the Earth from space, showing the Americas. Below the Earth, a black silhouette of a person stands on a dark, reflective surface, pointing towards a cluster of four interlocking golden gears. The scene is set against a dark, starry space background.

**СБОРНИК ТРУДОВ
MATERIALS**

**28-30 СЕНТЯБРЯ/28-30 SEPTEMBER 2017
НОВОСИБИРСК, РОССИЯ/NOVOSIBIRSK, RUSSIA**

**НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

**NOVOSIBIRSK
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Новосибирский государственный технический университет
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
Бийский технологический институт
Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева

**ИННОВАЦИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ
(ИнМаш – 2017)**

**INNOVATIONS
IN MECHANICAL
ENGINEERING
(ISPCIME – 2017)**

VIII Международная
научно – практическая конференция

VIII International scientific and
practical conference

Сборник трудов

Materials

Конференция организована при поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований

28 – 30 сентября / September 2017 г.

Новосибирск, Россия / Novosibirsk, Russia

УДК 621.002.2:005.591.6 (063)

И 665

И 665 **Инновации в машиностроении**: сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции / под ред. Х.М. Рахимянова . – Новосибирск: Изд – во НГТУ, 2017. – 592 с.

ISBN 978-5-7782-3326-3

В сборнике представлены труды 8-ой Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении (ИнМаш – 2017)», посвященные современным проблемам развития машиностроительной отрасли. Представлены разработки в области оборудования, инновационных технологий, автоматизации производства, материаловедении, экономики, менеджмента и образования в области машиностроения.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 17 – 08 – 20456 Г.

Организационный комитет

МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель

Батаев Анатолий Андреевич – доктор технических наук, профессор, ректор Новосибирского государственного технического университета (г. Новосибирск, Россия)

Почетные члены комитета

Томас Хассел – доктор технических наук, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница (г. Гарбсен, Германия)

Монико Грайф – профессор, доктор технических наук, Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук (г. Рюссельхайм, Германия)

Флориан Нюрнбергер – доктор технических наук, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница (г. Гарбсен, Германия)

Пантелеенко Фёдор Иванович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь)

Альгин Владимир Борисович – доктор технических наук, профессор, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси (г. Минск, Беларусь)

Хейфец Михаил Львович – доктор технических наук, профессор, Отделение физико-технических наук НАН Беларуси (г. Полоцк, Беларусь)

Клименко Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины (г. Киев, Украина)

Сунь Чан Сюн – доктор технических наук, профессор, Харбинский политехнический университет (г. Харбин, КНР)

Счигёл Норберт – доктор технических наук, профессор, Ченхостовский технологический университет (г. Ченстохова, Польша)

Петрова Мариана Матеева – доктор физ. мат наук, профессор, г. Велико Тырново, Болгария;

Суслов Анатолий Григорьевич – доктор технических наук, профессор МАМИ (г. Москва, Россия)

Фомин Василий Михайлович – доктор технических наук, профессор, академик РАН, ИТПМ СО РАН (г. Новосибирск, Россия)

Зайдес Семен Азикович – доктор технических наук, профессор, ИрГТУ (г. Иркутск, Россия)

Янюшкин Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор, БрГУ (г. Братск, Россия)

Попов Андрей Юрьевич – доктор технических наук, профессор, ОмГТУ (г. Омск, Россия)

Марков Андрей Михайлович – доктор технических наук, профессор, АлтГТУ (г. Барнаул, Россия)

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатели

Рахимьянов Харис Магсуманович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения НГТУ (г. Новосибирск, Россия)

Батаев Владимир Андреевич – доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой материаловедения в машиностроении НГТУ (г. Новосибирск, Россия)

Буров Владимир Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения в машиностроении НГТУ (г. Новосибирск, Россия)

Заместители председателей

Иванцовский Владимир Владимирович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования технологических машин НГТУ (г. Новосибирск, Россия)

Блюменштейн Валерий Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения КузГТУ (г. Кемерово, Россия)

Атапин Владимир Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры прочности летательных аппаратов НГТУ (г. Новосибирск, Россия)

Секретариат конференции

Гаар Надежда Петровна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения НГТУ (г. Новосибирск, Россия)

Семенова Юлия Станиславовна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения НГТУ (г. Новосибирск, Россия)

Члены комитета

Беляев Вячеслав Николаевич – кандидат технических наук, доцент, БТИ АлтГТУ (г. Бийск, Россия)

Клепцов Александр Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой технологии машиностроения КузГТУ (г. Кемерово, Россия)

Кречетов Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент, и. о. ректора КузГТУ (г. Кемерово, Россия)

Останин Олег Александрович – директор ООО «МИП Техмаш» (г. Кемерово, Россия)

Фирсов Александр Максимович – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой МРСИИ БТИ АлтГТУ (г. Бийск, Россия)

Рахмянов Андрей Харисович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения НГТУ (г. Новосибирск, Россия)

Рахмянов Константин Харисович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения НГТУ (г. Новосибирск, Россия)

УДК 621.002.2:005.591.6 (063)

ISBN 978-5-7782-3326-3 © Новосибирский государственный технический университет, 2017
© Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2017
© Бийский технологический институт, 2017
© Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

| СЕКЦИЯ 1 | SECTION 1 |
|---|--|
| <i>Технологическое оборудование и автоматизация проектирования машиностроительных производств</i> | <i>Technological equipment and automation of machine-building production designing</i> |
| РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА НА СТАДИИ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТА <i>Атапин В. Г.</i> | CALCULATION OF A MACHINING CENTER CARRYING SYSTEM AT THE PRELIMINARY DESIGN STAGE <i>Atapin V. G.</i> |
| КОНЕЧНО – ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ В ПРОГРАММЕ ANSYS <i>Верещагина А. С., Верещагин В. Ю.</i> | FINITE ULTIMATE ANALYSIS OF THE CUTTING PROCESS IN THE PROGRAM ANSYS <i>Vereshchagina A. S., Vereshchagin V. Y.</i> |
| НОВЫЕ ТИПЫ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ВИБРАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ <i>Рогова О. В., Тюляхова А. А., Нейман В. Ю.</i> | NEW TYPES OF CONSTRUCTIVE SCHEMES OF VIBRATION ELECTROMAGNETIC ENGINES FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT <i>Rogova O. V., Tyulyahova A. A., Neyman V. Yu.</i> |
| МЕТОДИКА РАСЧЕТА КРИТЕРИАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВА ПРИ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ <i>Янюшкин А. С., Рычков Д. А.</i> | METHODOLOGY OF CALCULATION OF CRITERIAL INDICATORS OF PRODUCTION AT THE RATIONALIZATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF PROCESSING OF DETAILS <i>Yanyushkin A. S., Rychkov D. A.</i> |
| ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ СТОЙКОСТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ <i>Анцев А. В.</i> | PREDICTION OF A CUTTING TOOL LIFE BASED ON THE POLYNOMIAL TOOL – LIFE EQUATION <i>Antsev A. V.</i> |
| МОДЕРНИЗАЦИЯ СТАНКА МОДЕЛИ 3Б632В ДЛЯ ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ <i>Красильников Б. А., Рахмьянов К. Х., Леонтьев И. А., Проскурин Р. С., Головкин Н. В.</i> | MODERNIZATION OF THE MACHINE MODEL 3Б632В FOR ELECTROCHEMICAL GRINDING <i>Krasilnikov B. A., Rakhmyanov K. kh., Leontyev I. A., Proskurin R. S., Golovko N. V.</i> |
| СЕКЦИЯ 2 | SECTION 2 |
| <i>Инновационные технологические процессы изготовления деталей, сборки машин и заготовительного производства</i> | <i>Innovative technological processes for manufacturing parts, machine assembling and blank production</i> |
| МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СВАРКИ РЕЛЬСОВ АЛЮМИНОТЕРМИТНЫМ СПОСОБОМ <i>Ильиных А. С., Галай М. С., Сидоров Э. С.</i> | THE MODELING PROCESS OF COOLING METAL DURING ALUMINOTHERMIC WELDING OF RAILS <i>Ilinykh A. S., Galay M. S., Sidorov Je. S.</i> |
| ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЕ ЛЕЗВИЕ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА, ПОЛУЧЕННОЕ СВЕРХСКОРОСТНЫМ ЗАТАЧИВАНИЕМ <i>Попов А. Ю., Реченко Д. С.</i> | THE BLADE IS HIGH QUALITY CARBIDE TOOLS, THE OBTAINED HIGH – SPEED SHARPENING <i>Popov A. Yu., Rechenko D. S.</i> |

| | | |
|--|---------|--|
| ВЛИЯНИЕ СВАРОЧНО – НАПЛАВОЧНЫХ РАБОТ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ СТАЛИ <i>Токарев А. О., Мироненко И. Г., Федотова Е. С.</i> | 6 67 | THE INFLUENCE OF WELDING – SURFACING WORKS ON THE FATIGUE STRENGTH OF STEEL <i>Tokarev A. O., Mironenko I. G., Fedotova E. S.</i> |
| МЕДНЫЙ ПОРОШОК, ПОЛУЧЕННЫЙ ИЗ ОТХОДОВ КАБЕЛЬНО – ПРОВОДНИКОВОЙ ПРОДУКЦИИ <i>Никитин Ю. Н.</i> | 75 | INFLUENCE OF MODES OF HEAT TREATMENT ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF OUTWARD SPRINGS OF ROLLING STOCK <i>Nikitin Yu. N.</i> |
| ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НАРУЖНЫХ ПРУЖИН ПОДВИЖНОГО СОСТАВА <i>Дубасов В. М., Могильная Е. П.</i> | 83 | INFLUENCE OF MODES OF HEAT TREATMENT ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF OUTWARD SPRINGS OF ROLLING STOCK <i>Dubasov V. M. Mogilnaja H. P.</i> |
| ОЦЕНКА ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ УПРОЧНЕНИИ ОСЦИЛЛИРУЮЩИМ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ <i>Зайдес С. А., Нгуен Ван Хинь</i> | 88 | THE EVALUATION OF SURFACE ROUGHNESS OF MACHINED PARTS UNDER STRENGTHENING BY OSCILLATING SMOOTHING <i>Zaydes S. A., Nguyen Van Hinh</i> |
| ВЫБОР ЭЛЕКТРОЛИТА ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ R12Ф3К10М3 <i>Ямпольский В.В., Иванова М. В., Кадырбаев Р. М., Журавлева А.В.</i> | 95 | THE CHOICE OF ELECTROLYTE FOR ELECTROCHEMICAL PROCESSING OF QUICK CUTTING STEELS R12F3K10M3 <i>Yanpolskiy V. V., Ivanova M. V., Kadyrbayev R. M., Zhuravleva A. V.</i> |
| КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНО – АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ <i>Абабков Н. В., Смирнов А. Н.</i> | 100 | THE APPLICATION OF SPECTRAL ACOUSTIC METHOD OF CONTROL FOR HARDENED SURFACE LAYER OF METAL PRODUCTS <i>Ababkov N. V., Smirnov A. N.</i> |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СТОЛБА СВАРОЧНОГО ДЫМА <i>Друзь О. Н.</i> | 105 | RESEARCH OF SPATIAL REGULARITIES OF THE COLUMN OF THE WELDING SMOKE <i>Druz O. N.</i> |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ТОЧЕНИЯ КАПРОЛОНА <i>Еренков О. Ю., Конобейская А. В.</i> | 110 | STADY OF THE POSSIBILITY OF A CERAMIC CUTTING TOOL FOR CAPROLON TURNING <i>Erenkov O. Yu., Konobeyskaya A. V.</i> |
| ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА КОНТРОЛЯ АЛМАЗНЫХ ПОРОШКОВ <i>Аскалонова Т. А., Леонов С. Л., Лукин Л. Н.</i> | 116 | IMPROVING THE QUALITY CONTROL OF DIAMOND POWDERS <i>Askalonova T. A., Leonov S. L., Lukin L. N.</i> |
| ИССЛЕДОВАНИЕ МОНОТОННОСТИ ТРУДА В ПОТОЧНО – КОНВЕЙЕРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ <i>Житная С. В.</i> | 122 | STUDY THE MONOTONY OF LABOR IN THREAD – ASSEMBLY PRODUCTION IN ENTERPRISES OF LIGHT INDUSTRY <i>Zhytnaya S. V.</i> |
| ПОДБОР АНИОННОГО СОСТАВА ЭЛЕКТРОЛИТА ДЛЯ ПРОШИВКИ МАЛЫХ ОТВЕРСТИЙ В МЕДИ <i>Рахимьянов Х. М., Василевская С. И., Журавлева А. В.</i> | 126 | THE CHOICE OF THE ANIONIC COMPOSITION OF ELECTROLYTE FOR FIRMWARE OF SMALL HOLES IN COPPER <i>Rakhimyanov Kh. M., Vasilevskaya S. I., Zhuravleva A. V.</i> |

| | | |
|---|------------|--|
| ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖУЩИХ СВОЙСТВ АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ <i>Янюшкин А. С., Попов В. Ю.</i> | 132 | RESEARCH OF CUTTING PROPERTIES OF DIAMOND TOOL ON METAL BOND <i>Yanyushkin A. S., Popov V. Y.</i> |
| ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИНДУКТОРА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ В ПРОЦЕССЕ МАГНИТНО – АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ <i>Леонов С. Л., Иконников А. М., Адам Кулавик, Гребеньков Р. В.</i> | 140 | FEATURES OF THE APPLICATION OF THE FINITE ELEMENT METHOD WHEN MODELING THE MAGNETIC FIELD OF THE INDUCTOR WITH PERMANENT MAGNETS IN THE PROCESS OF MAGNETIC ABRASIVE MACHINING <i>Leonov S. L., Ikonnikov A. M., Adam Kulawik, Grebenkov R. V.</i> |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ АНОДНОГО ПОВЕДЕНИЯ АРМСО – ЖЕЛЕЗА И ТИТАНОВОГО СПЛАВА ОТ – 4 В ВОДНОМ РАСТВОРЕ НИТРАТА НАТРИЯ <i>Гаар Н. П., Локтионов А.А., Давыдова С. А., Иванова Ю. С.,</i> | 146 | RESEARCH ON FEATURES OF ANODE BEHAVIOR OF ARMCO – IRON AND TITANIUM ALLOY IN AQUEOUS SOLUTION OF SODIUM NITRATE <i>Gaar N. P., Loktionov A. A., Davydova S. A. Ivanova Yu. S.</i> |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ РЕЗА ПРИ СМЕНЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАСКРОЯ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКОЙ <i>Гаар Н. П., Локтионов А. А., Герасимов Н.В.</i> | 153 | RESEARCH ON DEFECTS OF CUT WHEN CHANGING THE CUTTING DIRECTION BY HIGH – PRECISION PLASMA CUTTING OF SHEET MATERIAL <i>Gaar N. P. Loktionov A. A., Gerasimov N. V.</i> |
| РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ УДАРНОЙ МАШИНЫ С ИНЕРЦИОННЫМ РЕВЕРСОМ БОЙКА <i>Нейман Л. А.</i> | 158 | SOLVING THE EQUATIONS OF THE DYNAMICS OF THE WORKING PROCESS OF AN ELECTROMAGNETIC SHOCK MACHINE WITH THE INERTIAL REVERSION OF BOIKE <i>Neyman L. A.</i> |
| РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ШКВОРНЕВОГО УЗЛА АВТОМОБИЛЯ УАЗ С ПОДШИПНИКОМ КАЧЕНИЯ <i>Фирсов А. М., Овчаренко А. Г., Карагужин Х. Г., Смирнов В. В.</i> | 167 | DIMENSIONAL ANALYSIS OF UAZ PIVOT SITE WITH THE ROLLING BEARING <i>Firsov A. M., Ovcharenko A. G., Karagujn H. G., Smirnov V. B.</i> |
| АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА КНТ – 16 В СРЕДЕ НЕЙТРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ <i>Красильников Б. А., Василевская С.И., Головкин Н. В.</i> | 174 | ANODE BEHAVIOUR OF KNT – 16 ALLOY IN THE NEUTRAL ELECTROLYTES MEDIUM <i>Krasilnikov B. A., Vasilevskaya S. I., Golovko N. V.</i> |
| К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ РАЗМЕРНЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМИ КОМПОНОВКАМИ <i>Аникеева О. В.</i> | 179 | TO THE BUILDING OF THE FUNCTIONAL RELATIONSHIPS SYSTEM IN PROCESSING OF WORK PIECES ON MACHINES WITH CONSISTENT ARRANGEMENTS <i>Anikeeva O. V.</i> |
| НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОТРЕЗНЫХ КРУГОВ ПРИ СЛАБОЙ АНИЗОТРОПИИ МАТЕРИАЛА КОРПУСА <i>Аветисов Р. А., Ерошин С. С.</i> | 185 | STRESS - STRAIN STATE OF CUTTING DISCS WITH WEAK ANISOTROPY OF THE MATERIAL OF THE BODY <i>Avetisov R. A., Eroshin S. S.</i> |
| СОЗДАНИЕ ПРЯМОГО ПРИВОДА КОЛЬЦЕВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ БЕЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ОПОР <i>Ерошин С. С., Аветисов Р. А.</i> | 196 | THE DEVELOPMENT OF MACHINES AND DEVICES WITH DIRECT ROTATION OF ROTOR WITHOUT MECHANICAL SUPPORT <i>Eroshin S. S., Avetisov R. A.</i> |

| | | |
|--|-----|--|
| | 8 | |
| УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ РОТОРА БЕЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ОПОР <i>Ерошин С. С., Аветисов Р. А.</i> | 204 | STABILITY OF ROTOR MOTION WITHOUT MECHANICAL SUPPORTS <i>Eroshin S. S., Avetisov R. A.</i> |
| РАСЧЁТ ПРОФИЛЯ КРУГЛОГО ФАСОННОГО РЕЗЦА <i>Дудак Н. С., Касенов А. Ж., Итыбаева Г. Т., Мусина Ж. К.</i> | 212 | THE ROUND SHAPED CUTTERS PROFILE CALCULATION <i>Dudak N. S., Kasenov A. Zh., Itybayeva G. T., Mussina Zh. K.</i> |
| ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИТА <i>Марков А. М., Счигёл Норберт</i> | 219 | QUALITY ASSURANCE OF PARTS PRODUCTION FROM COMPOSITES <i>Markov A. M., Norbert sczygiol</i> |
| ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ НАНОКОМПОЗИТА «алмаз – WC» <i>Мельничук Ю. А., Клименко С. А., Копейкина М. Ю., Мановицкий А. С.</i> | 226 | TECHNOLOGICAL OPPORTUNITIES OF CUTTING TOOL FROM NANOCOMPOSIT "diamond – WC" <i>Melnychuk Yu. A, Klimenko S. A., Kopeykina M. Yu., Manovitsky A. S.</i> |
| ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ УПРОЧНЕННЫХ ППД ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА БАЗЕ МЕХАНИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ <i>Блюменштейн В. Ю.</i> | 232 | ASSESSMENT OF THE DURABILITY OF MACHINE PARTS STRENGTHENED WITH PLASTIC DEFORMATION OF THE SURFACE BASED ON THE MECHANICS OF TECHNOLOGICAL INHERITANCE <i>Blyumenshtein V. Ju.</i> |
| ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНО – ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ НЕСПЛОШНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ <i>Курлаев Н. В., Рынгач Н. А., Бобин К. Н.</i> | 249 | THE USE OF ELECTOMAGNETIC PULSE PROCESSING FOR REDUCING THE VOLUME OF CAVITY DEFECTS POROSITY IN AIRCRAFT PARTS <i>Kurlaev N. V., Ryngach N. A., Bobin K. N.</i> |
| МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ МНОГОГРАННЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН НА ШЛИФОВАЛЬНО – ЗАТОЧНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ <i>Васильев Е. В., Попов А. Ю.</i> | 260 | MODELING OF THE PROCESS OF GRINDING MULTIDIMENSIONAL PLATES ON THE GRINDING – GRINDING MACHINES WITH NUMERICAL SOFTWARE CONTROL <i>Vasiliev E.V., Popov A.Yu.</i> |
| СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ <i>Рахимьянов Х. М.</i> | 266 | MODERN ELECTROPHYSICAL TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING <i>Rakhimyanov Kh. M.</i> |
| СЕКЦИЯ 3 <i>Совершенствование образования в области машиностроения</i> | 278 | SECTION 3 <i>Improving education in engineering</i> |
| К ВОПРОСУ ПЕРЕХОДА РОССИИ НА НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ПО РАЗМЕРНОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ <i>Асанов В. Б., Гилета В. П., Безнедельный А. И.</i> | 278 | TO THE QUESTION OF RUSSIA'S TRANSITION TO NEW STANDARDS ON DIMENSIONAL AND GEOMETRIC ACCURACY <i>Asanov V. B., Gileta V. P., Beznedelnyjy A. I.</i> |
| О ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ БАКАЛАВРА МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ НОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ <i>Смирнов В. В., Овчаренко А. Г., Фирсов А. М.</i> | 287 | EDUCATIONAL PROGRAM DEVELOPMENT FOR THE BACHELOR DEGREE IN MECHANICAL ENGINEERING IN TERMS OF THE NEW EDUCATIONAL STANDARDS <i>Smirnov V. V., Ovcharenko A. G., Firsov A. M.</i> |
| СИТУАЦИОННЫЙ ПОДХОД К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ОБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ <i>Абслямова Г. А.</i> | 295 | CONTINGENCY APPROACH TO IMPROVEMENT OF ENGINEERING EDUCATION <i>Absalyamova G. A.</i> |

| | | |
|---|-----|--|
| | 9 | |
| ЦЕЛЕВАЯ ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ В НГТУ ПРОГРАММЫ «НОВЫЕ КАДРЫ ОПК» <i>Никитин Ю. В., Сурнина Т. Ю.</i> | 301 | TARGET TRAINING OF HUMAN RESOURCES FOR ENGINEERING ENTERPRISES IN FRAMEWORK OF IMPLEMENTATION IN NSTU THE PROGRAMS "NEW HUMAN RESOURCES OF THE MILITARY – INDUSTRIAL COMPLEX " <i>Nikitin Yu. V., Surnina T. Yu.</i> |
| ОПЫТ ТРЕХСТОРОННЕГО СОТРУДНИЧЕСТВА БОЛГАРСКИХ И РОССИЙСКИХ УНИВЕРСИТЕТОВ <i>Петрова М. М.</i> | 309 | EXPERIENCE OF THE TRIPARTITE COOPERATION WITHIN BULGARIAN AND RUSSIAN UNIVERSITIES <i>Petrova M. M.</i> |
| СЕКЦИЯ 4 <i>Нанотехнологии и материаловедение в машиностроении</i> | 313 | SECTION 4 <i>Nanotechnologies and materials science in machine – building</i> |
| ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕРОДА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТВЕРДОГО СПЛАВА WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂ <i>Дворник М. И., Михайленко Е. А.</i> | 313 | INFLUENCE OF CARBON CONCENTRATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES ULTRAFINE HARD ALLOY WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂ <i>Dvornik M. I., Mikhaylenko E. A.</i> |
| ПОЛУЧЕНИЕ СТЕКЛОПЛАСТИКА ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ <i>Еренков О. Ю., Чиркун В. Н.</i> | 319 | PRODUCTION OF HIGH STRENGTH FIBERGLASS <i>Erenkov O.Yu., Chirkun V. N.</i> |
| ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА ПУТЕМ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО <i>Еренков О. Ю., Узинская Д. Д.</i> | 326 | INCREASING THE STRENGTH OF FIBERGLASS BY MEANS OF EPOXY BINDING TREATMENT <i>Erenkov O. Yu., Uzinskaya D. D.</i> |
| МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ АЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РКУ – ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК <i>Рябичева Л. А., Бабич И. Н.</i> | 333 | MODELING AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EQUAL CHANNEL ANGULAR EXTRUSION OF SINTERED POROUS BILLETS <i>Ryabicheva L. A., Babich I. N.</i> |
| ФОРМИРОВАНИЕ УПРОЧЕННОГО СЛОЯ С ВЫСОКОЙ ТВЕРДОСТЬЮ В НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ <i>Ву Ван Гюи, Балановский А. Е.</i> | 341 | FORMATION HARDENED LAYER WITH HIGH HARDNESS IN LOW – CARBON STEEL WITH PLASMA SURFACE CARBURIZING <i>Vu Van Huy, Balanovsky A. E.</i> |
| СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ЧЕРЕЗ ПРОМЕЖУТОЧНУЮ ВСТАВКУ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ <i>Никulina А. А.</i> | 349 | STRUCTURE AND PROPERTIES OF DISSIMILAR STEELS JOINTS OBTAINED THROUGH AN INTERMEDIATE INSERT BY EXPLOSON WELDING <i>Nikulina A. A.</i> |
| ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ 3D – ПЕЧАТЬЮ НА СЖАТИЕ <i>Балашов А. В., Белоплотов С. В., Мальшев Е. А., Новиковский Е. А., Иконников А. М., Федоров В. А.</i> | 356 | RESEARCH OF PROPERTIES OF THE PRODUCTS RECEIVED 3D – PRINTING ON COMPRESSION <i>Balashov A. V., Beloplotov S. V., Malushev S. A., Novikovskiy E. A., Ikonnikov A. V., Fedorov V. A.</i> |
| СИНТЕЗ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ НЕКОТОРЫХ ТУГОПЛАВКИХ СОЕДИНЕНИЙ <i>Крутский Ю. Л., Квашина Т. С., Чушенков В. И., Ложкина Е. А.</i> | 361 | THE SYNTHESIS OF FINE – DISPERSED POWDERS OF SOME HIGH – MELTING COMPOUNDS <i>Krutskiy Yu. L. Kvashina T. S., Chushenkov V. I., Lozhkina E. A.</i> |

| | | |
|--|-----|--|
| <p>ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАПЛАВКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ СВАРНЫХ КРЕСТОВИН <i>Охрименко А. А.</i></p> | 10 | <p>APPLICATION OF CLADDING TECHNOLOGY TO IMPROVE THE RELIABILITY OF RAILROAD SWITCHES WELDED STRUCTURE <i>Okhremenko A. A.</i></p> |
| <p>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА НОПОРОШКА ТI И ТIО₂ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА АК12 <i>Башев В. С., Мартюшев Н. В., Чумаевский А. В., Зыкова А. П.</i></p> | 370 | <p>THE INFLUENCE OF NANOPOWDER TI AND TIO₂ ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALLOY AK12 <i>Bashev V. S., Martyshev N. V., Chumaevskii A. V., Zykova A. P.</i></p> |
| <p>ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ГЕТЕРОФАЗНОГО ЖЕЛЕЗО – УГЛЕРОДИСТОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО ИСКРОВЫМ ПЛАЗМЕННЫМ СПЕКАНИЕМ <i>Градусов И. Н., Рябинкина П. А., Скороход К. А.</i></p> | 375 | <p>STRUCTURAL INVESTIGATION OF HETEROPHASED IRON – CARBON ALLOY OBTAINED BY SPARK PLASMA SINTERING <i>Gradusov I. N., Ryabinkina P. A., Skorokhod K. A.</i></p> |
| <p>ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗНОСА МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО ФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА УЗЛА ТРЕНИЯ ПОГЛОЩАЮЩЕГО АППАРАТА <i>Марков А. М., Габец А. В., Иванов А. В., Габец Д. А.</i></p> | 380 | <p>RESEARCHING OF THE WEAR FRICTION CERMENT MATERIAL OF THE DRAFT GEAR <i>Markov A. M. Gabets A. V. Ivanov A. V. Gabets D. A.</i></p> |
| <p>ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРЕССОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДА НИКЕЛЯ, ПОЛУЧЕННОГО СПЕКАНИЕМ ПОРОШКА ВКНА МЕТОДОМ SPS <i>Немолочнов Д. А., Шевцова Л. И.</i></p> | 386 | <p>INFLUENCE OF THE PRESSING PRESSURE ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF AN ALLOY BASED ON NICKEL ALUMINIDE, OBTAINING BY SINTERING OF VKNA POWDER BY THE SPS METHOD <i>Nemolochnov D. A., Shevtsova L. I.</i></p> |
| <p>БОРИРОВАННЫЕ ПОРОШКИ ИЗ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ МАГНИТНО – АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ <i>Пантелеенко Ф. И., Пантелеенко Е. Ф., Петришин Г. В., Быстренков В. М.</i></p> | 394 | <p>BORATED POWDERS MADE OF WASTE PRODUCTS FOR MAGNETIC – ABRASIVE FINISHING <i>Panteleyenko F. I., Panteleyenko K.F., Petrishin G.V., Bystrenkov V. M.</i></p> |
| <p>ФИЗИКО – ХИМИЧЕСКИЙ СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ: ЭВОЛЮЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СТРОЕНИИ МАТЕРИАЛОВ <i>Хейфец М. Л., Колмаков А. Г., Клименко С. А.</i></p> | 403 | <p>PHYSICAL AND CHEMICAL STRUCTURE ANALYSIS <i>Kheifetz M. L., Kolmakov A. G., Klimenko S. A.</i></p> |
| <p>ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАММА ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ Ti – Al <i>Ситников А. А., Градобоев А. В., Яковлев В. И., Логинова М. В., Собачкин А. В., Мясников А. Ю., Грабов Ю. Е.</i></p> | 413 | <p>IMPACT OF GAMMA IRRADIATION ON THE STRUCTURE AND PHASE STATE OF THE SYSTEM Ti – Al <i>Sitnikov A. A., Gradoboev A. V., Yakovlev V. I., Loginova M. V., Sobachkin A. V., Miasnickov A. Yu., Gribov Yu. E.</i></p> |
| <p>СЕКЦИЯ 5 <i>Упрочняющие технологии и функциональные покрытия</i></p> | 421 | <p>SECTION 5 <i>Strengthening technology and functional coatings</i></p> |
| <p>МИКРОТВЕРДОСТЬ СОСТАВЛЯЮЩИХ В ДВУХСЛОЙНОМ МУЛЬТИМОДАЛЬНОМ ПОКРЫТИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ <i>Девоино О. Г., Луцко Н. И., Лапковский А. С.</i></p> | 421 | <p>PHASES MICROHARDNESS IN TWO – LAYER MALTIMODAL COATING AT DIFFERENT PROCESSING PARAMETERS OF LASER CLADDING <i>Devoino O. G., Lutsko N. I., Lapkovskii A. S.</i></p> |

| | | |
|---|-----------|--|
| РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШАЮЩЕЙ КАЧЕСТВО ВАЛОВ МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ <i>Зайдес С. А., Горбунов А. В.</i> | 11 428 | DEVELOPING EFFECTIVE TECHNOLOGY OF IMPROVING THE QUALITY OF LOW RIGIDITY SHAFT <i>Zaydes Semen, Gorbunov A. V.</i> |
| ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ВОЛЬФРАМОКОБАЛЬТОВЫМИ ТВЕРДОСПЛАВНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ <i>Буров В. Г., Веселов С. В.</i> | 436 | TECHNOLOGICAL FOUNDATIONS OF STEEL MACHINE PARTS STRENGTHENING WITH CEMENTED CARBIDE COATINGS <i>Burov V. G., Veselov S. V.</i> |
| ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ ЛАЗЕРНО – ПЛАЗМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ <i>Гербер А. Ю.</i> | 443 | SURFACE HARDENING LOW CARBON STEEL IN LASER – PLASMA TREATMENT <i>Gerber A. J.</i> |
| ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ <i>Нго Као Кыонг, Зайдес С. А.</i> | 448 | EVALUATION OF THE STRESS STATE UNDER LOCAL LOADING OF CYLINDRICAL BODY IN DYNAMIC MODELING CONDITION <i>Ngo Cao Cuong, Zaides S. A.</i> |
| ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ОБЖАТИЯ НА НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ОБКАТКИ ПЛОСКИМИ ПЛИТАМИ <i>Зайдес С. А., Фам Дак Фьонг</i> | 457 | INFLUENCE OF PERCENTAGE REDUCTION ON STRESS – STRAIN STATE OF CYLINDRICAL PARTS UNDER TRANSVERSE BURNISHING <i>Zaydes S. A., Pham Dac Phuong</i> |
| ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ 20 ПОСЛЕ ЦЕМЕНТАЦИИ И ЗАКАЛКИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОЛИТНО – ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА <i>Рахимьянов Х. М., Рахимьянов К. Х., Еремина А. С., Анищенко О. И.</i> | 465 | OPTIMIZATION OF REGIME PARAMETERS OF ULTRASONIC PLASTIC DEFORMATION OF SURFACE LAYER STEEL 20 AFTER CEMENTATION AND THERMOHARDENING DURING ELECTROLYTE – PLASMA HEATING <i>Rakhimyanov Kh. M., Rakhimyanov K. Kh., Eremina A. S., Anischenko O. I.</i> |
| ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО РАСТВОРЕНИЯ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ПГ – 10Н – 01 <i>Янпольский В. В., Кадырбаев Р. М., Иванова М. В., Юсупов А. С.</i> | 474 | FEATURES OF ELECTROCHEMICAL DISSOLUTION OF THE COATING BASED ON POWDER MATERIAL PG – 10N – 01 <i>Yanpolskiy V. V., Kadyrbaev R. M., Ivanova M. V., Yusupov A. S.</i> |
| К МЕХАНИЗМУ ИЗНОСА ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УПРОЧНЯЮЩЕ – ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКЕ <i>Гилета В. П., Безнедельный А. И., Асанов В. Б., Бычков Н. В.</i> | 480 | TO THE MECHANISM OF WEARING OF THE HARD ALLOY TOOL UNDER ULTRASONIC RE-INFORCING FINISHING TREATMENT <i>Gileta V. P., Beznedelnyj A. I., Asanov V. B., Bychkov N. V.</i> |
| СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА ПРОТОЧНОГО ХРОМИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СТВОЛА СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ <i>Беляев В. Н., Козлюк А. Е., Лобунец А. В., Андреев А. С.</i> | 486 | PERFECTING OF THE WAY OF THE FLOWING CHROME – PLATING OF THE INTERNAL SURFACE OF TRUNKS OF SMALL ARMS <i>Belyaev V. N., Kozlyuk A. Yu., Lobunets A. V., Andreyev A. S.</i> |

| | | |
|--|-------------------|---|
| <p>АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЁТА ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ МАГНИТНО – ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ <i>Овчаренко А. Г., Козлюк А. Ю., Курепин М. О.</i></p> | <p>12 492</p> | <p>THE AUTOMATED METHOD OF CALCULATION OF THE TOOL FOR THE COMBINED MAGNETIC – IMPULSE TREATMENT <i>Ovcharenko A. G., Kozlyuk A. Yu., Kurepin M. O.</i></p> |
| <p>КАЧЕСТВО МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ <i>Иванцовский В. В., Зверев Е. А., Вахрушев Н. В., Бредихина А. Н.</i></p> | <p>498</p> | <p>QUALITY OF CERAMIC – METAL WEAR – RESISTANT PLASMA COATINGS <i>Ivancivsky V. V., Zverev E. A., Vakhrushev N. V., Bredikhina A. N.</i></p> |
| <p>НАЗНАЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТОНКОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ <i>Рахмьянов Х. М., Семенова Ю. С., Андросов О. А.</i></p> | <p>503</p> | <p>ASSIGNMENT MENT OF TECHNOLOGICAL MODE OF ULTRASONIC SURFACE HARDENING OF PARTS WITH THIN LAYER COATINGS <i>Rakhmyanov Kh. M., Semyonova Yu. S., Androsov O. A.</i></p> |
| <p>ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ДЕФОРМАЦИИ И ЗАПАСА ПЛАСТИЧНОСТИ С ПАРАМЕТРАМИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ <i>Блюменштейн В. Ю., Мирошин И. В., Петренко К. П.</i></p> | <p>510</p> | <p>CORRELATION EVALUATION OF DEFORMATION AND PLASTICITY RESERVE WITH SIGNAL PARAMETERS OF ACOUSTIC STRUCTURE EXAMINATION <i>Blumenstein V. Yu., Miroshin I. V., Petrenko K. P.</i></p> |
| <p>СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СЛОЕВ Ti – TiC – TiB ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВНЕВАКУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО – ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ <i>Ленивцева О. Г., Чучкова Л. В.</i></p> | <p>523</p> | <p>STRUCTURE AND PROPERTIES OF Ti – TiC – TiB LAYERS FABRICATED BY NON – VACUUM ELECTRON – BEAM CLADDING <i>Lenivtseva O. G., Chuchkova L. V.</i></p> |
| <p>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРОЧНЯЮЩЕГО ОБКАТЫВАНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ <i>Блюменштейн В. Ю., Митрофанова К. С.</i></p> | <p>528</p> | <p>MODELING OF THE STRENGTHENING SURGERY PROCESS WITH A SPECIAL DEFORMING TOOL <i>Blyumenshtein V. Ju., Mitrofanova K. S.</i></p> |
| <p>ФОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОТДЕЛОЧНО – УПРОЧНЯЮЩЕЙ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ <i>Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э., Гребенкин Р. В.</i></p> | <p>538</p> | <p>FORMATION OF RELIABILITY INDICATORS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF FINISHING AND HARDENING VIBRATION PROCESSING OF MACHINE PARTS <i>Tamarkin M. A., Tischenko E. E., Grebenkin R. V.</i></p> |
| <p>СЕКЦИЯ 6 <i>Экономика, менеджмент и организация машиностроительного производства</i></p> | <p>546</p> | <p>SECTION 6 <i>Economics, management and organization of engineering production</i></p> |
| <p>РАСЧЕТ СТОИМОСТИ ПРОИЗВОДСТВА БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТРУБЫ МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ <i>Кучумова И. Д., Низовкина Н. Г., Рубцова О. А.</i></p> | <p>546</p> | <p>CALCULATION OF COST MANUFACTURING OF BIMETALLIC TUBES BY EXPLOSION WELDING <i>Kuchumova I. D., Nizovkina N. G., Rubtsova O. A.</i></p> |
| <p>ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЗАТРАТ НА НАУЧНО – ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ РАБОТУ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ <i>Рубцова О. А., Кучумова И. Д.</i></p> | <p>550</p> | <p>ECONOMIC CALCULATION OF EXPENDITURES ON SCIENTIFIC – RESEARCH WORK ON RESEARCH OF PLASMA COATINGS <i>Rubtsova O. A., Kuchumova I. D.</i></p> |
| <p>РАСЧЕТ СТОИМОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРЕТИРОВАННЫХ УГЛЕРОД – ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ <i>Бердюгина И. С., Баннов А. Г.</i></p> | <p>554</p> | <p>CALCULATION OF VALUE OF PRODUCTION OF ELECTRETED CARBON – EPOXY COMPOSITES <i>Berdyugina I. S., Bannov A. G.</i></p> |

| | | |
|--|-----------|---|
| РАСЧЁТ СТОИМОСТИ ПРОИЗВОДСТВА САМОФЛЮСУЮЩЕГОСЯ ПОКРЫТИЯ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО – ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ <i>Иванова А. В.</i> | 13 559 | CALCULATION OF VALUE OF PRODUCTION OF NI-BASED SELF – FLUXING COATING OBTAINED BY THE NON – VACUUM ELECTRON BEAM WELDING <i>Ivanova A. V.</i> |
| СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СМК МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТИЗАЦИИ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ <i>Овчаренко А. Г., Фирсов А. М.</i> | 563 | IMPROVEMENT OF THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM OF MACHINE BUILDING ORGANIZATION THROUGH THE STANDARDIZATION OF PRODUCT QUALITY <i>Ovcharenko A. G., Firsov A. M.</i> |
| СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УСЛОВИЙ ТРУДА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ <i>Дейнека И. Г., Сало В. И., Пронина Ю. Г.</i> | 569 | MODERN CONDITIONS AT THE MECHANICAL ENGINEERING ENTERPRISES <i>Deyneka I. G., Salo V. I., Pronina Y. G.</i> |
| АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ УЧЕТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОДУКЦИИ <i>Маркова М. И.</i> | 575 | AUTOMATED MANAGEMENT OF ACCOUNTING MANUFACTURING PRODUCTION <i>Markova M. I.</i> |
| АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ИМПОРТОЗА МЕНЮЮЩЕЙ ПРОДУКЦИИ НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ <i>Дубов Г. М., Широколобова А. Г., Ашихмин В. Е., Винидиктов А. В.</i> | 581 | ANALYSIS OF OPPORTUNITIES TO PRODUCE NEW IMPORT – SUBSTITUTING PRODUCTS AT MACHINE – BUILDING ENTERPRISES OF KEMEROVO REGION <i>Dubov G. M., Shirokolobova A. G., Ashikhmin V. E., Vinidiktov A. V.</i> |
| МЕТОД МАРКЕТИНГОВОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕРНЕТ – РЕСУРСА: А/В ТЕСТИРОВАНИЕ <i>Чахлова К. В., Грабко Е. С., Низовкина Н. Г.</i> | 586 | METHOD OF MARKETING RESEARCH ONLINE RESOURCE: A/B TESTING <i>Grabko E. S., Chahlova Ch. V., Nizovkina N. G.</i> |
| ПЕРСПЕКТИВЫ МОТИВАЦИИ РАБОТНИКОВ РОССИЙСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ КРИЗИСА <i>Наумова Ю. Н., Стародубцева В. К.</i> | 589 | PERSPECTIVES OF MOTIVATION OF EMPLOYEES OF RUSSIAN ENTERPRISES IN ACRISIS <i>Naumova Yu. N., Starodubtseva V. K.</i> |



Приветствую участников и гостей VIII Международной научно-практической конференции «ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ-2017»!

Конференция, организованная по инициативе содружества ведущих ВУЗов Сибири, таких как Новосибирский государственный технический университет, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Бийский технологический институт, направлена на создание условий для обмена результатами исследований ученых и специалистов ведущих российских и зарубежных ВУЗов, научно-исследовательских институтов, а также на развитие регионального и международного сотрудничества.

Обсуждение новых идей, новаторских решений по внедрению современных технологий как в производство, так и в образовательный процесс способствует развитию машиностроительной отрасли. Машиностроение же, в свою очередь, создает техническую базу, определяющую будущее практически всех отраслей промышленности.

Убежден, что проведение конференции международного уровня на базе нашего университета послужит укреплению существующих и установлению новых связей между научными сообществами.

Желаю всем участникам конференции плодотворного сотрудничества и успехов в научной, производственной и педагогической деятельности на благо экономического и социального развития России.

Ректор Новосибирского государственного
технического университета,
д.т.н., профессор

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'A' followed by a series of loops and a final flourish.

А.А. Батаев

УДК 621.9.06

РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА НА СТАДИИ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТА

*АТАПИН В. Г., доктор техн. наук, профессор
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Атапин В.Г. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: teormech@ngs.ru

Аннотация

Рассматривается решение задачи по обеспечению на этапе проектирования минимальной массы тяжелого многоцелевого станка при заданной точности и производительности механической обработки. Для решения задачи используется совместная работа методов оптимизации и метода конечных элементов. Показано, что на этапе моделирования несущей системы станка для типовых условий эксплуатации масса несущей системы в результате оптимизации на 35 % меньше его производственного варианта. В процессе оптимизации основным является ограничение на перемещение шпинделя в направлении действия максимальной составляющей силы резания.

Ключевые слова: расчетное проектирование, многоцелевой станок, несущая система, метод конечных элементов, методы оптимизации.

Введение

В современном станкостроении на этапе проектирования несущих систем и отдельных несущих конструкций широко используется метод конечных элементов (МКЭ) [1 – 5]. Однако выбранный вариант конструкции, полученный в результате расчетов МКЭ, не является лучшим в абсолютном смысле, так как исследованы не все возможные варианты [6]. Более эффективным направлением является использование МКЭ в сочетании с методами оптимизации. Отметим некоторые постановки задач в станкостроении по оптимальному проектированию.

1. В работах [7, 8] рассматриваются задачи оптимального проектирования станин токарного и фрезерного станков, траверсы и колонны радиально-сверлильного станка. Постановка задачи оптимизации включает минимизацию массы при ограничениях по прочности, жесткости, низшим частотам собственных колебаний и устойчивости автоколебаний. Несущие конструкции моделируются стержневыми конечными элементами. Задача решается методом штрафных функций, получено уменьшение массы до 20 %.

2. В работе [9] за целевую функцию принимается стоимость изготовления конструкций при ограничениях на точность и производительность механической обработки и на локальные деформации. Здесь предложен многоэтапный метод проектирования, использующий упрощенные модели несущей системы (стержневые элементы коробчатого типа) и включающий три этапа: упрощение конструкции, оптимизация и реализация. Задача оптимизации решается на основе метода штрафных функций.

3. В работе [10] применяется анализ чувствительности для расчета токарно – карусельного станка; выбранный вариант стойки имеет уменьшенную массу (на 10 %) и податливость (более чем в два раза).

На практике, как известно, при проектировании станок разделяют на подконструкции по кон

структивной зависимости. Однако, так как силовые и деформационные взаимосвязи на границах контакта подконструкций неизвестны, то проектирование идет методом последовательных приближений для удовлетворения взаимных требований, что удлиняет сроки проектирования. При проектировании новых узлов тяжелых и уникальных станков основным является подход, основанный на опыте проектировщика, а также использовании унифицированных и стандартных решений. В связи со сложностью современных многоцелевых станков актуальным остается разработка научно обоснованной технологии проектирования таких станков.

Целью настоящей работы является изложение основных этапов новой технологии проектирования оптимальных несущих конструкций тяжелого МС сверлильно – фрезерно – расточной группы, предназначенного для обработки корпусных деталей массой до 200 т (рис. 1). Структурно МС состоит из фрезерно-расточного станка и поворотно-подвижного стола.

Теория

Заданными считаются компоновка многоцелевого станка, ограничения внешних размеров несущей системы станка, внешняя нагрузка и условия опирания. Сформулируем следующую задачу: спроектировать несущие конструкции, которые удовлетворяли бы условиям прочностной надёжности и минимально возможной массе при заданных нормах точности и производительности меха-

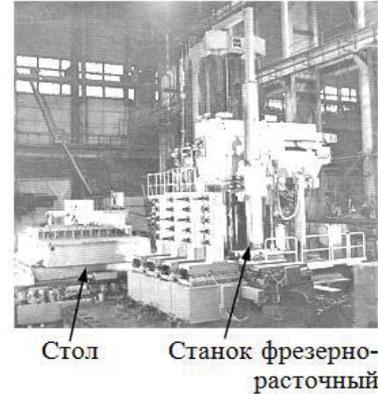


Рис. 1. Тяжелый многоцелевой станок

нической обработки. Поставленная задача решается за четыре этапа (рис. 2).

Этап I (рис. 2, блок 1). Определяются внешние нагрузки на основе детерминированных или вероятностных моделей.

Этап II (рис. 2, блок 2). Расчет несущей системы (НС) с упрощенными по геометрии несущими конструкциями. Конструкции моделируются пространственными структурами с упрощенной геометрией поперечного сечения (стержень, коробчатый профиль, пластина и т.д.). Формулируется задача математического программирования:

$$\text{минимизировать} \quad f(X) = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i \quad (1)$$

при ограничениях на:

$$\text{напряжения (прочность)} \quad g_1(X) = 1 - \sigma_{\text{экв}} / [\sigma] \geq 0, \quad (2)$$

$$\text{перемещения (жесткость)} \quad g_2(X) = 1 - \Delta / [\Delta] \geq 0, \quad (3)$$

$$\text{переменные проектирования} \quad g_3(X) = V_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где ρ – плотность материала; V – объем материала конструкции; $\sigma_{\text{экв}}$, $[\sigma]$ – эквивалентное

и допускаемое напряжения; Δ , $[\Delta]$ – расчетные и допускаемые перемещения инструмента в зоне резания.

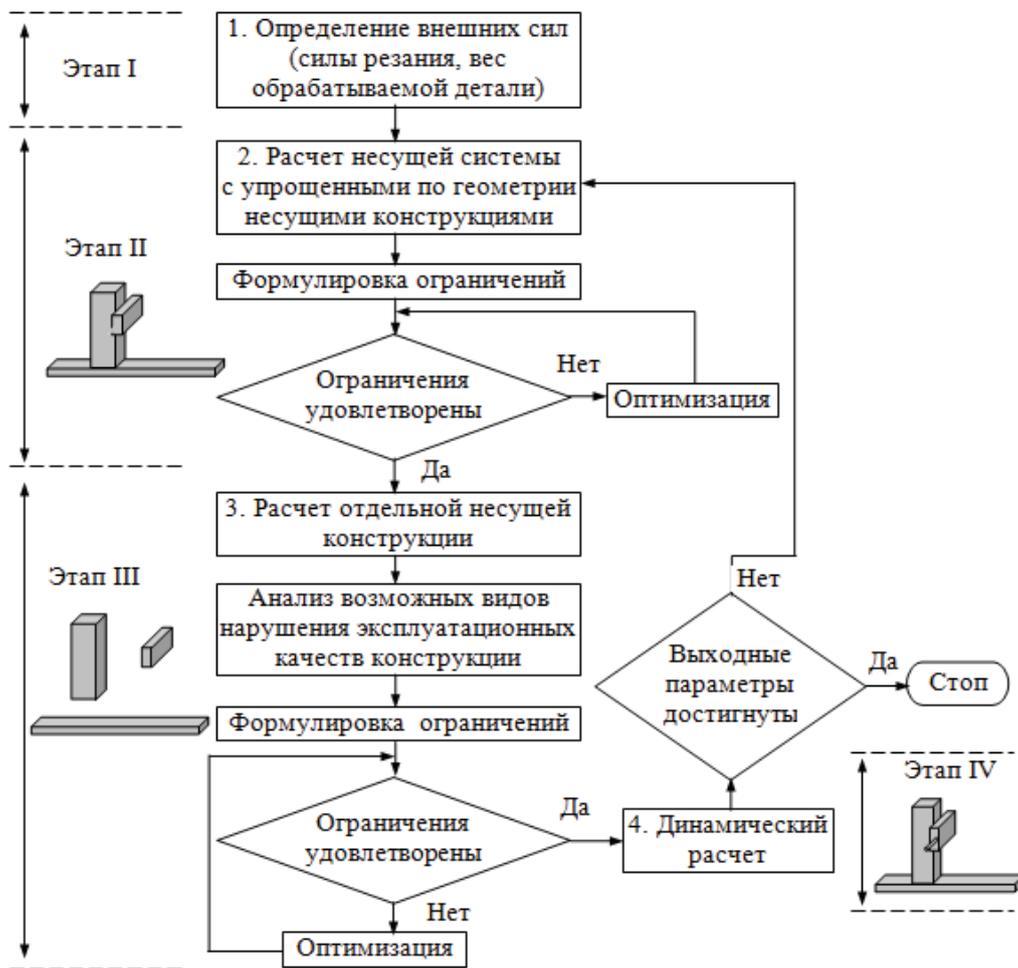


Рис. 2. Блок – схема проектирования несущих конструкций МС

За целевую функцию (1) принимается масса конструкции, так как рассматривается проектирование тяжелых станков массой до 400 т. Внешней нагрузкой для несущей системы являются силы резания. Переменными проектирования являются геометрические размеры поперечного сечения несущих конструкций, в частности, толщина профиля. Задача (1) – (4) решается методом штрафных функций в форме

$$\varphi(X, r) = f(X) + r \sum_{j=1}^J [1/g_j(X)]$$

с использованием при решении задачи безусловной оптимизации метода Давидона – Флетчера – Пауэлла (ДФП) [11, 12]. В результате определяются силовые и кинематические условия для отдельной несущей конструкции.

Этап III (рис. 2, блок 3). Рассматривается расчет отдельной несущей конструкции (стойка, шпиндельная бабка и др.) при удовлетворении силовых и кинематических условий, полученных на этапе II. Целевая функции – масса конструкции. Ограничения задачи оптимизации формируются на

основе возможных нарушений эксплуатационных показателей конструкции (нарушения условий прочности, жёсткости, потери устойчивости и др.). В результате получаем оптимальную конструкцию с реальной геометрией поперечного сечения.

Этап IV (рис. 2, блок 4). Проводится динамический анализ или имитационное моделирование для типовых условий эксплуатации несущей системы с оптимальными несущими конструкциями.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим расчет НС фрезерно – расточного станка (стойка 1, шпиндельная бабка 2, станина 3) с упрощенными по геометрии несущими конструкциями (рис. 3). В соответствии с этапом II (рис. 2) несущие конструкции имеют упрощенную геометрию поперечного сечения (коробчатый профиль, стержень, пластина и т.д.).

Расчетные условия: торцовое фрезерование; наибольшее усилие подачи 40 кН при черновой обработке и 3 кН при чистовой обработке; соотношение составляющих силы резания $F_x : F_y : F_z = 0,5 : 1,0 : 0,7$; учитываются отклонения от плоскостности и прямолинейности обрабатываемой поверхности (ГОСТ 24643 – 81, 6 квалитет); шпиндельная бабка находится в крайнем верхнем положении при среднем положении стойки на станине, а вылеты шпинделя ($\leq 0,4$ м) и ползуна ($\leq 0,6$ м) соответствуют предельным значениям, характерным для чистовой обработки.

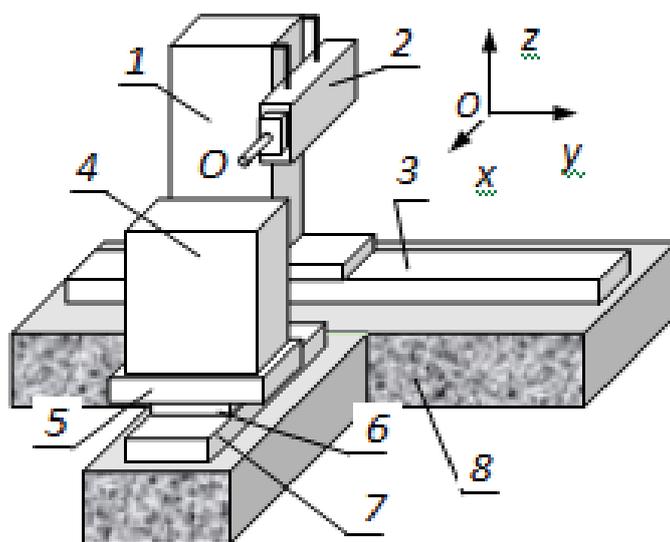


Рис.3. Компоновка многоцелевого станка:

1 – стойка; 2 – шпиндельная бабка; 3 – станина; 4 – обрабатываемая деталь;
5 – паллета; 6 – сани стола; 7 – станина стола; 8 – фундамент

Конечноэлементная модель НС станка (рис. 4, а) содержит пластинчатые четырехузловые конечные элементы для моделирования стойки, корпуса шпиндельной бабки и станины; шпиндель моделируется пространственным стержневым конечным элементом. В расчетах учитываются упругие деформации и контактные деформации в стыках несущей системы. При оценке контактных деформаций геометрическая модель конструкции создается в системе проектирования SolidWorks, а конечно-элементный анализ модели проводится средствами комплекса ANSYS при использовании модели соединения Frictionless ANSYS.

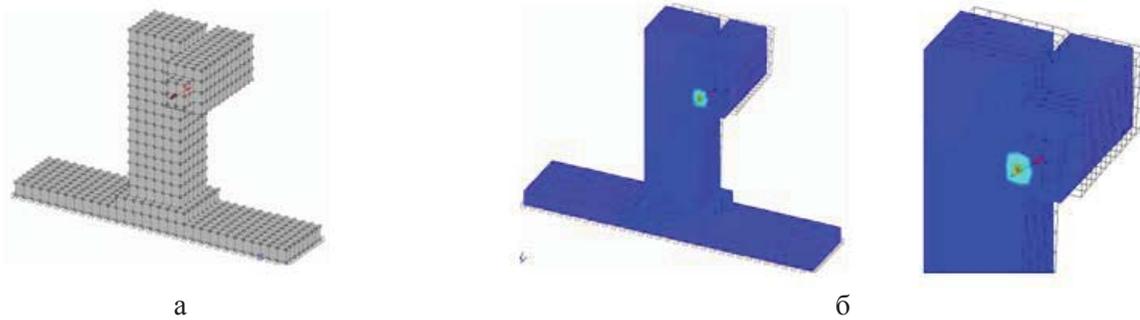


Рис. 4. Исходное (а) и деформированное (б) состояния НС станка

Расчет НС проводится на основе модели (1) – (4). Эффективным является вариант НС, имеющий наименьшую массу и перемещения в зоне обработки, не превышающие допустимых перемещений. При расчете НС используется авторское программное обеспечение, реализующее интегрированную работу МКЭ и методов оптимизации [13].

Основные результаты расчетов НС станка в зависимости от условий эксплуатации приведены в таблице. На рис. 4, б показано деформированное состояние НС станка. Вариант НС станка (оптимальный), полученный в результате интегрированной работы МКЭ и методов оптимизации, имеет меньшую массу по сравнению с серийным вариантом и его согласно принятой системе предпочтений следует признать лучшим. Результаты расчетов также показывают, что, при проектировании станка на типовые условия эксплуатации выигрыш по массе составляет около 35 %. Активным ограничением является перемещение конца шпинделя по оси у (действует максимальная составляющая силы резания)

Результаты расчета НС станка

| Параметр | Результаты расчета НС станка для условий эксплуатации | | | |
|--|---|-------------|---------------------|-------------|
| | Серийный | Предельные | | Типовые* |
| Вариант НС | | Оптимальный | МКЭ без оптимизации | Оптимальный |
| Размеры сечения, м: | | | | |
| стойка | 2,0×2,46 | 1,8×2,6 | 2,0×2,46 | 1,8×2,6 |
| шпиндельная бабка | 1,3×2,20 | 1,7×2,0 | 1,6×2,00 | 1,7×2,0 |
| ползун | 0,6×0,80 | 0,8×0,8 | 0,6×0,8 | 0,8×0,8 |
| Перемещения в зоне резания (расчёт/норма): | | | | |
| по оси x | 0,52 | 0,67 | 0,76 | 0,68 |
| по оси y | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| по оси z | 0,51 | 0,54 | 0,42 | 0,61 |
| Масса, т | 169,9 | 158,2 | 202,8 | 102,2 |

*Типовые условия эксплуатации: чистовая обработка, фреза диаметром 250 мм, число зубьев 20, глубина резания 0,5 мм, частота вращения шпинделя 170 мин⁻¹.

Выводы

Полученные результаты на примере расчета несущей системы многоцелевого станка показывают высокую эффективность применения рассмотренной технологии проектирования на этапе эскизного проекта. Сочетание МКЭ и методов оптимизации позволило определить оптимальные внешние габариты конструкций несущей системы и получить при проектировании станка на типовые условия эксплуатации выигрыш по массе до 35 %. В результате расчета установлено, что наиболее активным ограничением является перемещение конца шпинделя по оси y в направлении действия наибольшей составляющей силы резания. Расчет НС с использованием МКЭ без методов оптимизации позволил получить работоспособный вариант несущей системы, но менее эффективный вследствие невозможности рассмотреть все возможные варианты компоновки НС. Оптимальный вариант НС является хорошей базой для проектирования далее несущих конструкций (стойка, шпиндельная бабка, станина и др.) на этапе технического проекта с разработкой в дальнейшем рабочих проектов несущих конструкций.

Список литературы

1. Атапин В.Г. Расчет деформированного состояния фундамента тяжелого многоцелевого станка // Вестник машиностроения. – 1989. – № 6. – С. 31 – 32.
2. Витес Б.И., Гроссман В.М., Кравцов О.А. Проектирование корпусных деталей металлорежущих станков с использованием метода конечных элементов // Станки и инструмент. – 1991. – № 5. – С. 13–14.
3. Пахмутов В.А., Шалдыбин А.Я. Использование метода конечных элементов для анализа конструкций базовых деталей тяжелых станков // Станки и инструмент. – 1992. – №2. – С. 11 – 13.
4. Lull B. Statische und dynamische Berechnung von Werkzeugmaschinenstellen // Maschinenbautechnik. – 1977. – Vol.26, N1. – P.10 – 13.
5. Roscher A. Berechnung der dynamischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinenstellen mit Hilfe der Methode der finiten Elemente // Maschinenbautechnik. – 1978. – Vol.27, N 4. – P. 156 –160.
6. Haug E. J., Choi K. K., Komkov V. Design sensitivity analysis of structural systems.. – Orlando, Florida: Academic Press, 1986. – 381 p. – (Mathematics in Science and Engineering; vol.177).
7. Rao S.S., Grandhi R.V. Optimum design of radial drilling machine structure to satisfy static rigidity and natural frequency requirements // Journal of Mechanical Design. – 1983. – Vol.105, iss. 2. – P. 236 – 241. – doi: 10.1115/1.3258515.
8. Reddy C.P., Rao S.S. Automated optimum design of machine-tool structures for static rigidity, natural frequencies and regenerative chatter stability // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 1978. – Vol. 100, iss. 2. – P. 137 – 146. – doi: 10.1115/1.3439401.
9. Yoshimura M., Takeuchi Y., Hitomi K. Design optimization of machine-tool structures considering manufacturing cost, accuracy and productivity // Journal of Mechanical Design. – 1984. – Vol. 106, iss. 4. – P. 531 – 537. – doi: 10.1115/1.3258606.
10. Хомяков В.С., Яцков А.И. Оптимизация несущей системы одностоечного токарно-карусельного станка // Станки и инструмент. – 1984. – № 5. – С. 14–16.
11. Ravindran A., Ragsdell K.M., Reklaitis G.V. Engineering Optimization: methods and applications. – 2nd ed. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. – 688 p. – ISBN-10: 0 – 471 – 55814 – 1. – ISBN – 13: 978 – 0 – 471 – 55814 – 9.
12. Bunday B.D. Basic optimization methods. – London: Edward Arnold, 1984. – 136 p. – ISBN – 13: 978 – 0 – 713 – 13506 – 0. – ISBN: 0 – 713 – 13506 – 9.
13. Атапин В.Г., Гапонов И.Е., Павин А.Г. Автоматизация проектирования тяжелых многоцелевых станков // Тезисы докл.: I Всесоюзный съезд технологов-машиностроителей. – М., 1989. – С. 42 – 43.

**CALCULATION OF A MACHINING CENTER CARRYING SYSTEM
AT THE PRELIMINARY DESIGN STAGE**

Atapin V.G., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: teormech@ngs.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

At design of a carrying system of a machining center one of the main criteria is the reduction of mass. For the given configuration of a machining center it is required to find such distribution of material on a carrying system at which conditions of strength reliability are satisfied with minimum possible mass and the set precision and productivity of machining. For the solution of a task the technology of rational design of a carrying system offered by us uses the principle of decomposition and the integrated work of the finite element method with optimization methods. The main stages of this technology are optimization of the carrying system of the machine with the supporting constructions simplified on geometry and optimum design of the individual supporting constructions for definition of real geometry of cross section. Calculation of the carrying system with the simplified supporting constructions (without edges of rigidity, partitions, etc.) is made for limit and operating conditions of working. Calculations showed that at design on operating conditions of working the mass of the optimum carrying system decreases by 35 %. Active restriction is strain of an end face of a spindle in the direction of action of the maximum making cutting force.

Keywords: machining center, design, carrying system, finite element method, optimization methods.

КОНЕЧНО – ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ В ПРОГРАММЕ ANSYS

¹ВЕРЕЩАГИНА А. С., канд. техн. наук, доцент,
²ВЕРЕЩАГИН В. Ю., старший препод.,
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)

Верещагина А.С. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
¹Новосибирский государственный технический университет,
Верещагин В.Ю. – 630126, г. Новосибирск, ул. Вилюйская, 28,
Новосибирский государственный педагогический университет,
e – mail: osa321@gmail.com; Klirickv@gmail.com

Аннотация

Работа посвящена вопросу моделирования процесса резания с использованием метода конечных элементов, в программной среде ANSYS (модуль Workbench Explicit Dynamics). Исследованы поля напряжений и деформаций элементов системы резания при обработке заготовок, выполненных из алюминиевого сплава. Целью расчета является определение напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовки и резца в текущие моменты процесса резания. Результаты исследований показали, что принятый метод и методика исследований позволяют выявить распределение нормальных эквивалентных и касательных напряжений и в материале инструмента, и в материале заготовки.

Ключевые слова: моделирование напряжений и деформаций срезаемого слоя используя среду ANSYS, метод конечных элементов.

Введение

Математическое описание напряженно – деформированного состояния металла в процессе резания в настоящее время совершенствуется и основывается на большом объеме экспериментальных данных, полученных различными методами. В статье представлены результаты исследования напряженно – деформированного состояния срезаемого слоя в процессе резания с помощью программного комплекса ANSYS. Программа ANSYS предназначена для моделирования процессов различной физической природы, связанных с механикой деформируемого твердого тела.

Рассмотрена задача процесса врезания недеформируемого резца в алюминиевую пластину. Схема процесса резания [1] показана на рис. 1.

На рис. 1 режущий инструмент (РИ), позиция 1, показан в форме клина с передним углом γ и углом заострения β . Заготовка 2 имеет форму параллелепипеда с длиной l , шириной b и высотой h . t – глубина резания, v – скорость резания.

Моделирование процесса резания на основе расчёта напряжённо – деформированного состояния заготовки выполнено с использованием ряда приведенных ниже допущений:

1. Не учитывалось выделение тепла в зоне резания.
2. Коэффициент трения по передней поверхности резца принят постоянным по всей ее длине и не зависящим от касательных напряжений.
3. Коэффициент трения по задней поверхности принят постоянным и равным коэффициенту трения на передней поверхности.

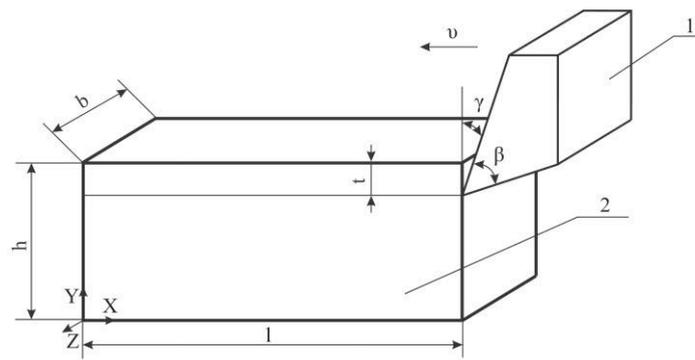


Рис. 1. Принятая схема резания

Методика экспериментального исследования

В качестве инструментария моделирования выбран программный комплекс ANSYS Workbench, пространственный режим — 3D, тип расчета — динамический. Целью расчета является определение напряженно – деформированного состояния (НДС) заготовки и реза в текущие моменты процесса резания. Геометрическая модель схемы резания, представлена на рис. 2.

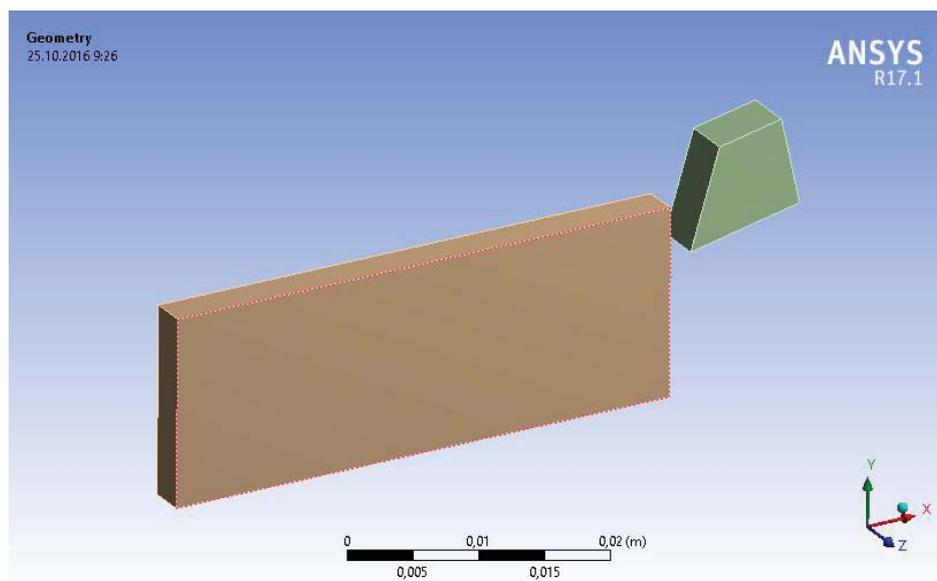


Рис. 2. Геометрическая модель схемы резания

Численное моделирование процесса резания осуществлено:

а) для заготовки, выполненной из: алюминиевого деформируемого сплава марки АМг6 (предел текучести $190 \cdot 10^6$ Па, плотность 2640 кг/м^3 , коэффициент линейного расширения алюминия $2,4 \cdot 10^{-6}$, начальная температура 22°C , модуль Юнга $71 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона 0,32, модуль сдвига $27 \cdot 10^9$ Па.);

в) для глубины резания $t = 4 \cdot 10^{-3}$ м;

г) для скорости резания: – АМг6 $v = 500$ м/мин

д) конечно – элементная сетка построена на основе элемента SOLID186, который является стандартным для моделирования трехмерных объектов в среде ANSYS. Форма элементов SOLID186 может быть вырожденной: четырехгранной, призматической, пирамидальной. Положительное по знаку давление на поверхности элемента направлено нормально поверхности «внутри» элемента.

Данный тип элементов позволяет применяться в задачах, учитывающих пластичность, ползучесть, вязкоупругость и вязкопластичность, а также при наличии больших деформаций и больших перемещений [2]. Пример разбиения объектов конечно – элементными сетками показан на рис.3.

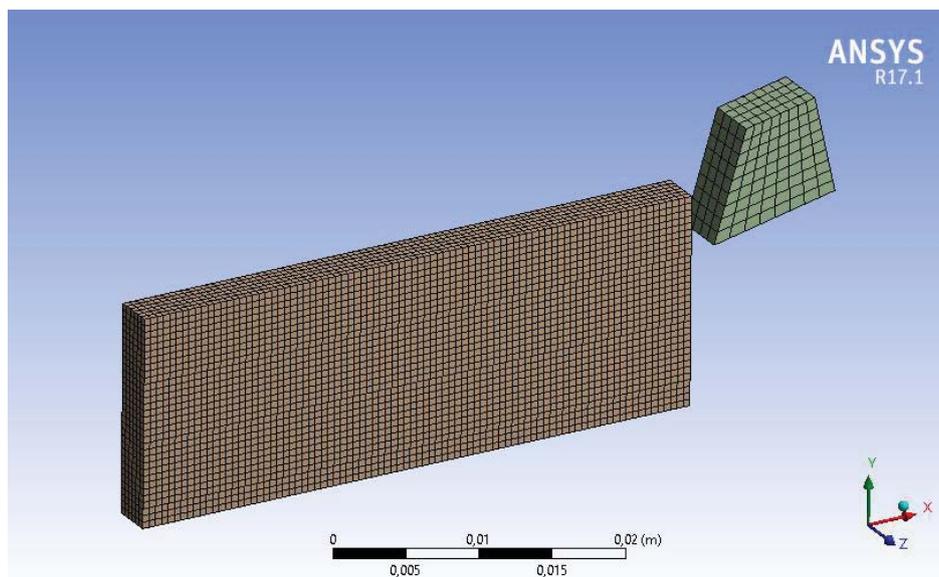


Рис. 3. Конечно – элементная модель заготовки и резца

В качестве граничных условий принято:

- узлам, лежащим на нижней и торцевых поверхностях заготовки, запрещены любые перемещения;
- узлам, лежащим на боковых поверхностях заготовки, запрещены перемещения по оси Z глобальной системы координат;
- узлам, лежащим на торцевых поверхностях резца, запрещены перемещения.

Результаты и обсуждение

Результаты исследований показали, что принятый метод и методика исследований позволяют выявить распределение нормальных эквивалентных и касательных напряжений и в материале инструмента, и в материале заготовки. Далее во внимание нами приняты только напряжения в материале заготовки. По известным значениям напряжений представляется возможным определить значения пластических деформаций материала заготовки на протяжении всего процесса резания с необходимой дискретизацией процесса по времени.

В численных экспериментов с электронной моделью процесса резания рассмотрены особенности напряжённо-деформированного состояния материала заготовки, выполненной из алюминия марки АМг6. На рис. 4 – 5 представлены отдельные примеры (раскадровка) расчёта и построения полей деформаций на основе использования моделирования процесса резания в разные моменты времени, а именно, на рис. 4 показан момент резания на четверти длины l заготовки, на рис. 5 – момент резания на двух третях длины l

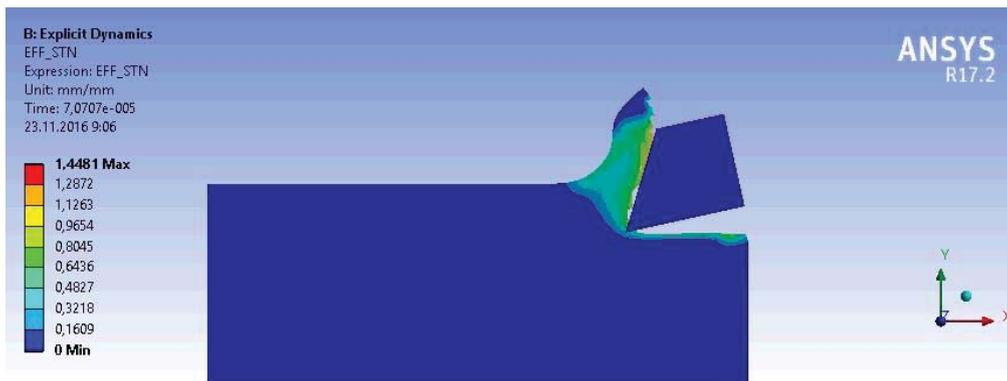


Рис. 4. Распределение деформаций в заготовке в момент резания на четверти длины заготовки

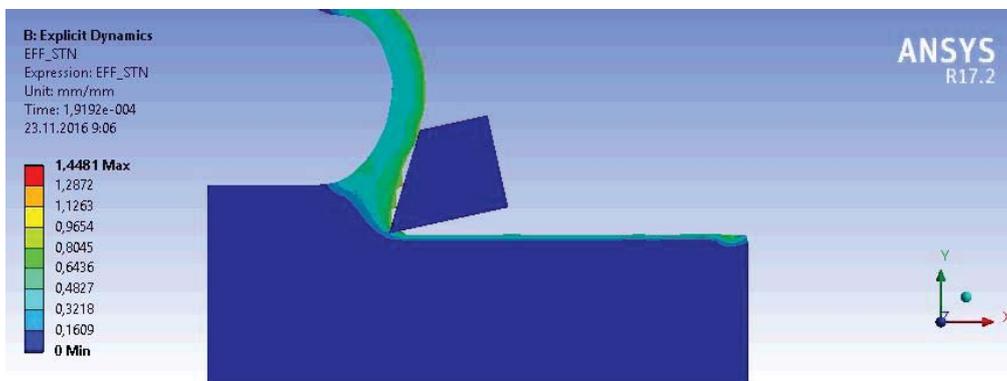


Рис. 5. Распределение деформаций в заготовке в момент резания на двух третях длины заготовки

Анализ данных рисунков позволяет заключить:

а) максимальные значения величин деформаций достигаются в первые же мгновения резания, затем они стабилизируются и остаются постоянными;

б) местоположение зоны с максимальными значениями деформаций не постоянно по отношению к режущему лезвию, конфигурация и протяжённость этой зоны тоже переменна, что свидетельствует о многоэтапности и многовариантности плоскости сдвига;

г) принятая модель чувствительна на изменение состояния материала настолько, что позволяет зафиксировать моменты:

- разделения стружки на сегменты, рис 5;
- отделения стружки от материала заготовки;
- образования заусенца в момент выхода инструмента из материала заготовки.
- изменения радиуса завивания стружки относительно режимов резания или изменения материала заготовки согласно [3]

Оценка адекватности используемого подхода выполнена сопоставлением результатов, полученных при анализе электронной модели процесса резания, с фотографиями корней стружек, полученных при исследованиях на электронном микроскопе. Такой пример показан на рис.6. Из него следует, что картина моделирования и реальный процесс резания обладают необходимой адекватностью.

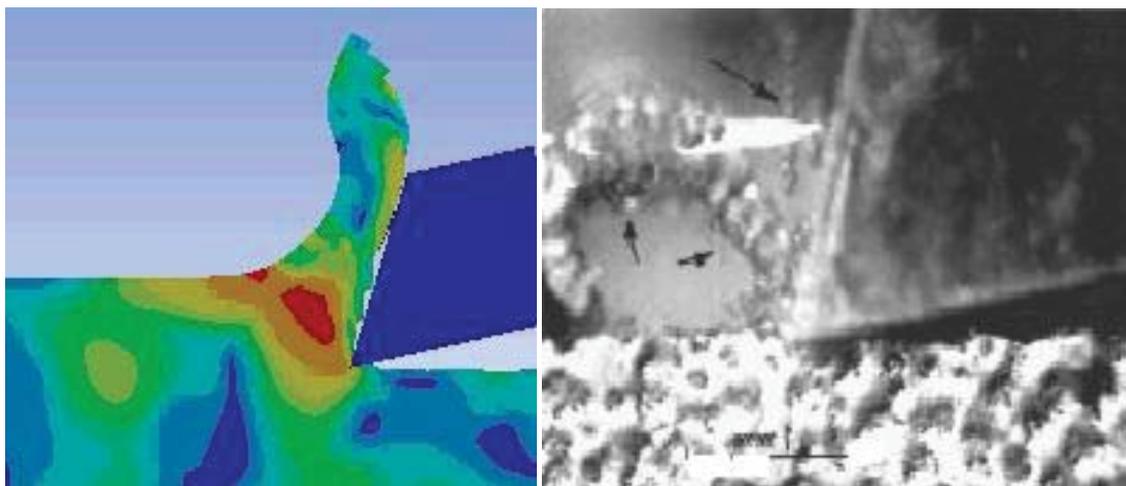


Рис. 6. Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными [4] данными (материал заготовки АМгб): а - компьютерная модель резания; б – фото корня стружки

На рис. 6 б стрелками показано местоположение зон с критическими величинами напряжений, а именно стрелки вблизи режущей кромки инструмента указывают местоположение материала заготовки, имеющего напряжения, сопоставимые с напряжениями сдвига, т.е. местоположение предполагаемой зоны плоскости сдвига; стрелка вблизи белой зоны у передней поверхности показывает предполагаемое местоположение наростообразования

Выводы

1. Полученные результаты подтвердили, что в среде программного комплекса ANSYS определение напряженно – деформированного состояния заготовки и резца осуществимо.
2. Результаты не противоречат данным, полученным другими авторами [4, 5] другими методами.
3. Используемый в работе подход и программный комплекс позволяют в сравнении с другими указанными подходами и программными средами, моделировать различные процессы механической обработки. Отслеживать механизмы стружкообразования в разные моменты времени.

Список литературы

1. Нарыжный, А. Г. Термомеханическая модель процесса резания резцом с износостойким покрытием / А. Г. Нарыжный, Ю. Н. Куценко, М. В. Гром, Д. Р. Степаненко // *Авиационно-космическая техника и технология*, – 2014. – № 5 (112). – С. 4 – 10.
2. Брасов, К.А. Графический интерфейс ANSYS. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 248 с.
3. Кравченко, Е. Г. Управление процессом завивания стружки при резании в условиях автоматизированного производства: Автореф... дис. канд. техн. наук. – Комсомольск-на-Амуре, КнАГТУ, 1999. – 23 с.
4. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / Д.В. Криворучко, В.А.Залого. – Сумы: Университетская книга, 2012. – 496 с ISBN 978 – 966 – 680 – 645 – 4.

5. Залогов, В. А. Обзор способов экспериментального определения параметров уравнения состояния пластических материалов для моделирования методом конечных элементов их механической обработки / В. А. Залогов, Д. В. Криворучко // Резание и инструмент в технологических системах. – 2005. – № 69. – С. 193 – 202.

FINITE ULTIMATE ANALYSIS OF THE CUTTING PROCESS IN THE PROGRAM ANSYS

Vereshchagina A.S., PhD in Engineering, Assistant Professor, e – mail: osa321@gmail.com

Vereshchagin V.Y., student, e – mail: Klirickv@gmail.com

Komsomolsk-na-Amure State Technical University, 27 Prospect Lenina, Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russian Federation

Abstract

The work is devoted to the modeling of the cutting process using the finite element method, in the ANSYS software environment (Workbench Explicit Dynamics module). The fields of stresses and deformations of the elements of the cutting system are studied in the processing of blanks made of aluminum alloy. The purpose of the calculation is to determine the stress-strain state of the workpiece and tool at the current moments of the cutting process. The results of the research showed that the adopted method and research technique allow to reveal the distribution of normal equivalent and tangential stresses both in tool material and in the material of the billet.

Keywords: Modeling stresses and deformations of the cut layer using the ANSYS environment, the finite element method.

УДК 621.313.17

**НОВЫЕ ТИПЫ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ВИБРАЦИОННЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**

*РОГОВА О. В., старший преподаватель,
ТЮЛЯХОВА А. А., студент,
НЕЙМАН В. Ю., доктор техн. наук, профессор
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Рогова О.В. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: rogoва@corp.nstu.ru

Аннотация

В работе представлен вариант конструктивного исполнения линейного электромагнитного двигателя с зубцово – пазовой зоной для виброкомпрессора. Установлено, что наличие зубцово – пазовой зоны в конструкции магнитной системы двигателя обеспечивает повышение значений тягового усилия и безударный режим работы технологического оборудования. В сравнении с известными конструкциями предлагаемые варианты исполнения позволяют улучшить тяговые характеристики электромагнитного двигателя и наиболее просто обеспечить их согласование при питании от источника напряжения промышленной частоты по однополупериодной схеме выпрямления.

Ключевые слова: линейный электромагнитный двигатель, зубцово – пазовая зона двигателя, вариант конструктивного исполнения, согласование тяговых характеристик.

Введение

В настоящее время рынок компрессорного оборудования представлен огромным количеством моделей как промышленного, так и бытового назначения. Маломощные компрессоры с давлением до 10 атм. находят широкое применение на станциях техобслуживания автотранспортных средств, в бытовом холодильном и медицинском оборудовании, системах кондиционирования воздуха, агрографии, строительном пневмоинструменте и т.д.

В большинстве современных компрессорах рабочий орган приводится в движение электродвигателями вращательного принципа действия. В данном оборудовании наиболее слабым звеном, наряду с клапанной системой, являются передаточные механизмы, преобразующие вращательное движение двигателя в возвратно-поступательное движение рабочего органа. Поэтому актуальным является разработка конструкций компрессоров, в которых отсутствуют передаточные механизмы. Это возможно при использовании в электроприводе компрессоров вместо двигателей вращательного движения двигателей возвратно-поступательного движения, в частности электромагнитных [1 – 3].

В настоящее время электропривод электромагнитных компрессоров находится на новом витке развития. Мировая потребность в таких устройствах подтверждается выпуском с 2001 г. компанией LG холодильных компрессоров с линейными электромагнитными двигателями. Однако, разработчики данного оборудования так же столкнулись с проблемой соударения элементов конструкции компрессора.

Несмотря на давнее использование электромагнитных двигателей методы для их расчета и проектирования, как и способы реализации возвратно-поступательного движения исполнительных органов продолжают совершенствоваться [4 – 11].

Одним из перспективных путей решения данной проблемы является разработка и внедрение двигателей с зубчатыми элементами конструкции магнитной системы, что позволит добиться улучшения тяговых характеристик и безударного режима работы линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД) [12, 13].

На основании проведенного анализа и выявленных путей развития линейных электромагнитных двигателей для электроприводов виброкомпрессоров на кафедре ТОЭ совместно с кафедрой ТОПП Новосибирского государственного технического университета были разработаны новые конструктивные схемы ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной силовых элементов магнитной системы [14, 15].

Описание разработки

В отличие от известных вариантов исполнения ЛЭМД новые конструкции позволяют при малых значениях рабочего хода якоря получать максимальные значения статического тягового усилия. Примеры конструктивного исполнения ЛЭМД представлены на рис. 1

Наличие зубцово – пазовой зоны магнитной системы двигателя обеспечивает повышение значений тягового усилия и безударный режим работы устройства. Оригинальность предлагаемых решений защищена патентами РФ [16, 17].

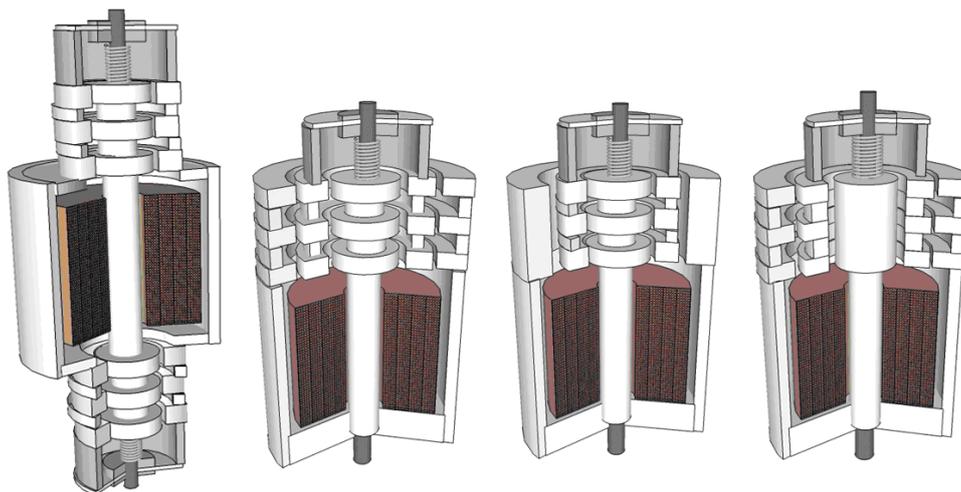


Рис. 1. Варианты конструктивного исполнения ЛЭМД с зубцово – пазовой зоной

Электромагнитный двигатель работает следующим образом: при подаче импульса напряжения на обмотку по ней протекает пульсирующий ток, создающий магнитное поле, силовые линии которого замыкаются через выполненные по длине якоря зубцы, воздушные технологические зазоры и зубцы, выполненные на полюсах статора. Под действием электромагнитных сил, возникающих в зубцово – пазовой зоне, и противодействующих сил упругости пружины, якорь совершает возвратно-поступательные движения относительно неподвижного статора.

Так как магнитный поток переменный, то при изменении потока и равенстве его нулю, приложенная к якорю электромагнитная сила также становится равной нулю. В момент бестоковой паузы, за счет упругих сил пружины, якорь возвращается в начальное состояние до прихода следующего импульса тока. Затем цикл повторяется

Выполнение двигателей цилиндрической формы позволяет технологически просто изготовить элементы магнитопровода и направляющих устройств для прямолинейного перемещения якоря.

В предлагаемых вариантах ЛЭДМ в течение периода питающего тока, якорь совершает одно полное колебание, что при частоте источника 50 Гц соответствует 3000 колебаний в минуту. Устройство получает питание по однополупериодной схеме выпрямления и работает в вибрационном режиме.

С целью повышения энергетических характеристик при работе устройства на пульсирующем токе предлагается выполнять элементы магнитопровода из шихтованного материала, что позволит снизить потери вихревые токи [18, 19]. Вариант конструктивного исполнения такого ЛЭМД приведен на рис. 2.

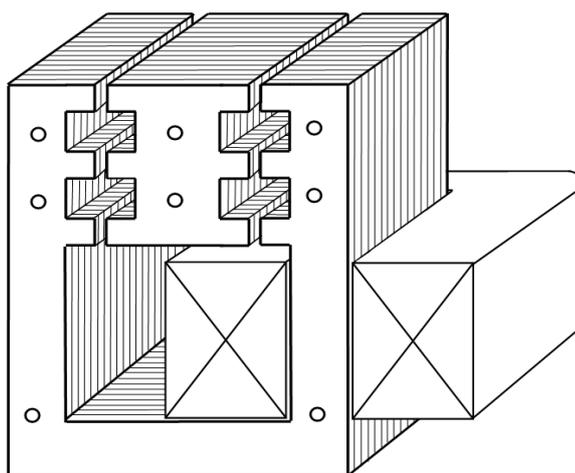


Рис. 2. Варианты конструктивного исполнения ЛЭМД

Результаты и выводы

В заключение следует отметить, что предлагаемый вариант конструктивного исполнения линейного электромагнитного двигателя с зубцово – пазовой зоной в сравнении с известными конструкциями позволяет улучшить тяговые характеристики электромагнитного двигателя и наиболее просто обеспечить их при питании двигателя от источника промышленной частоты по однополупериодной схеме выпрямления. Технология исполнения элементов магнитопровода из шихтованного электротехнического материала позволяет уменьшить потери от действия вихревых токов.

Предлагаемое новое конструктивное решение может быть использовано при разработке и проектировании линейных электромагнитных двигателей с зубцово – пазовой зоной различного по назначению технологического вибрационного оборудования, питание которого осуществляется от промышленной сети однофазного переменного напряжения, без применения для этого специальных электронных устройств управления.

Следующий этап исследований электромагнитных двигателей с зубцово – пазовой зоной предполагает разработку комплексной динамической модели в составе технологического оборудования при работе на компрессорную нагрузку, что позволит увеличить возможности при решении вопросов оптимизации и повышения энергоэффективности [20 – 25].

Список литературы

1. Ряшенцев Н.П. Электромагнитный привод линейных машин / Н.П. Ряшенцев, В.Н. Ряшенцев. Новосибирск: Наука. – 1985. – 153 с.
2. Мошкин В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели / В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – 220 с.
3. Нейман В.Ю. Интегрированные линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий / В.Ю. Нейман // Электротехника. – 2003. – № 9. – С. 25 – 30.
4. Нейман В.Ю. К вопросу учета главных размеров при выборе типа электромагнита по значению конструктивного фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова, А.А. Скотников, О.В. Рогова // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 50 – 53.
5. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Повышение точности аналитического расчета радиальных сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных элементов магнитопровода // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 1 (58). – С. 246 – 256.
6. Нейман В.Ю. Режимы форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях / В.Ю. Нейман // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2003. – № 1. – С. 105 – 112.
7. Нейман В.Ю. Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей / В.Ю. Нейман, А.А. Петрова // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47 – 50.
8. Нейман Л.А. Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (97). – С. 214 – 218.
9. Нейман В.Ю. Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // Автоматизированные электромеханические системы: [сб. науч. тр.]. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177 – 187.
10. Нейман В.Ю. О методике к выбору типа электромагнита по значениям конструктивного фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 2. – С. 310 – 313.
11. Нейман Л.А. К оценке выбора типа электромагнита по значению конструктивного фактора / Л.А. Нейман, А.А. Петрова, В.Ю. Нейман // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 62 – 64.
12. Рогова О. В. Линейный электромагнитный двигатель с улучшенными тяговыми характеристиками для виброкомпрессора: дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / Рогова Ольга Валерьевна. - Новосибирск, 2016. - 199 с.
13. Нейман Л.А. К исследованию тяговых характеристик электромагнитных приводов с учетом зубчатости элементов магнитопровода / Л.А. Нейман, О.В. Рогова // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2013. – № 1 (20). – С. 100 – 108.
14. Нейман В.Ю. Линейные электромагнитные компрессоры / В.Ю. Нейман, О.В. Рогова // Автоматизированные электромеханические системы: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 92 – 99.
15. Нейман В.Ю. Принципы построения конструктивных схем электромагнитных приводов для бытового компрессорного оборудования / В.Ю. Нейман, О.В. Рогова // сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Иваново: Изд-во Иванов. гос. энергет. ун-т им. В. И. Ленина, 2011. – С. 106-112.
16. Пат. 112722, МПК F04B45/00. Электромагнитный компрессор / В.Ю. Нейман, О.В. Рогова. – № 2011133626/06; Заявлено 10.08.11; Оpub. 20.01.12, Бюл № 2. – 2 с.: ил.
17. Пат. 2526852, H02K33/02, H02K1/06. Электромагнитный двигатель (варианты) / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, О.В. Рогова. – № 2012146808/07; Заявлено 01.11.12; Оpub. 27.08.14, Бюл № 24. – 7 с.: ил.

18. Нейман Л.А. Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 154 – 162.
19. Нейман Л.А. Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Том 19. – № 1. – С. 73 – 78.
20. Нейман Л.А. Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 6. – С. 35 – 40.
21. Нейман Л.А. Динамическая модель электромагнитного привода колебательного движения для систем генерирования низкочастотных вибраций / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 3 (28). – С. 75 – 87.
22. Нейман Л. А. Математическая модель динамики электромагнитного ударного узла с упругими связями / Л. А. Нейман, В. Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2016. - № 2 (31). - С. 94 – 107.
23. Нейман Л.А. Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка / Л. А. Нейман, В. Ю. Нейман // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. - 2016. – № 5. – С. 32 – 40.
24. Нейман Л.А. Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник МЭИ. – 2016. – № 6. – С. 64 – 71.
25. Нейман Л.А. Математическая модель динамики однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с двухсторонним выбегом бойка / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2016. - № 3 (32). - С. 98 – 114.

NEW TYPES OF CONSTRUCTIVE SCHEMES OF VIBRATION ELECTROMAGNETIC ENGINES FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Rogova O.V., Senior Lecturer, e – mail: rogoval@corp.nstu.ru

Tyulyahova A.A., Student, e – mail: olgaryu13@rambler.ru

Neyman V.Yu., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: nv.nstu@ngs.ru

Novosibirsk State Technical University, prospekt K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The paper presents a variant of the design of a linear electromagnetic motor with a tooth-groove zone for a vibration compactor. It is established that the presence of a tooth-slotted zone in the design of the magnetic system of the engine ensures the increase in the values of tractive effort and the unstressed operating mode of the technological equipment. In comparison with the known designs, the proposed embodiments allow improving the traction characteristics of the electromagnetic motor and it is most simple to ensure their matching when powered by a power frequency voltage source in a half-wave rectification scheme.

Keywords: linear electromagnetic motor, tooth-slotted motor zone, version of the design, harmonization of traction characteristics.

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА КРИТЕРИАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ПРОИЗВОДСТВА ПРИ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ**

*ЯНЮШКИН А. С., доктор техн. наук, профессор,
РЫЧКОВ Д. А., канд. техн. наук, доцент
(БрГУ, г. Братск, Россия)*

Янюшкин А.С. – 665709, г.Братск, ул.Макаренко, 40,
Братский государственный университет,
e – mail: yanyushkin@brstu.ru; dielektrik84@mail.ru

Аннотация

Повышение эффективности производства достигается путем оптимизации технологического процесса обработки деталей. Для этого требуется определить режимы резания, характеристики режущего инструмента и оборудования, рациональные для конкретных условий производства. В настоящем исследовании представлена методика сравнительного анализа вариантов реализации технологического процесса, которая позволит оптимизировать изготовление деталей. Реализация методики представлена на примере сравнительного анализа вариантов технологического процесса фрезерования композиционного материала с варьированием материала режущей части, где были рассмотрены несколько производственных условий. По результатам анализа разработаны рекомендации по условиям резания для отдельных случаев обработки.

Ключевые слова: сравнительный анализ, эффективность производства, оптимизация.

Введение

Проектирование технологического процесса обработки деталей предполагает установление таких параметров, как режимы резания, характеристики режущего инструмента, стоимость расходных материалов и т.п. При этом учитываются характеристики обрабатываемого материала, возможности технологического оборудования и др. Эти параметры выбираются таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность производства, в том числе повысить надежность оборудования, режущего инструмента, качество и производительность обработки, а также экономичность.

В настоящее время рост эффективности производства обеспечивается внедрением новых конструкций режущих инструментов [1 – 6], использованием прогрессивных методов обработки, связанных с электрофизическими и электрохимическими процессами [7 – 10], рационализацией режимов обработки [11 – 13] и т.п.

Оценку изменения эффективности производства при выполнении заданных мероприятий необходимо производить на стадии проектирования, поскольку в противном случае внедрение новых технологий может дать обратный результат. Также необходимо учитывать, что для разных производств показатели эффективности могут различаться, что выражается в особенностях проектирования технологических процессов.

Для решения этих проблем предлагается разработать методику сравнительного анализа вариантов реализации технологического процесса обработки деталей, которая позволит оптимизировать их изготовление с целью повышения эффективности производства. Для этого необходимо выявить критерии эффективности, присущие технологическому процессу и задать условия, при которых будет осуществляться сравнительный анализ

Методика сравнительного анализа вариантов реализации технологического процесса

Определение рационального варианта реализации технологического процесса обработки деталей основано на выявлении критериев, которые тем или иным образом оказывают влияние на производство деталей в каждом конкретном случае [14, 15]. Обозначим эти критерии через K , тогда множество критериев технологического процесса можно записать в виде: $K = \{K_1, K_2, K_3 \dots K_j\}$, где j – индекс критерия эффективности.

Обозначим набор параметров технологического процесса через Y . Тогда множество сравниваемых технических решений, включающих определенный набор параметров, представим в виде: $Y = \{Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_i\}$, где i – индекс записи с набором параметров.

Тогда матрица смежности примет вид:

$$M(a_{ij}) = \begin{array}{c|cccccc} & K_1 & K_2 & K_3 & \dots & K_k \\ \hline Y_1 & a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1k} \\ Y_2 & a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2k} \\ Y_3 & a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_n & a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nk} \end{array} \quad (1)$$

где n – количество сравниваемых технических решений; k – количество критериев, присущих исследуемому производственному процессу.

Соответствующий критерий оценивается по количественным значениям, которые принимают элементы матрицы.

Матрицу смежности необходимо строить с учетом того, большее или меньшее значение критерия является оптимальным. Если наибольшее значение критерия свидетельствует о его предпочтительности, то элемент a_{ij} принимается равным величине критерия: $a_{ij} = [K_{ij}]$. В противном случае, при условии, когда меньшее значение критерия указывает на его предпочтительность, необходимо принимать a_{ij} , равное обратному результату расчета величины критерия:

$$a_{ij} = \frac{1}{[K_{ij}]}$$

Таким образом, реализуется правильный порядок определения рациональной технологии обработки при задаваемых производственных условиях. Матрица смежности имеет количество столбцов равное числу критериев, по которым производится сравнительная оценка и количество строк равное числу сравниваемых вариантов технологического процесса.

Каждый из критериев имеет ряд параметров $t = \{t_1, t_2, t_3 \dots t_m\}$, влияющих на его значение. Влияние этих параметров на величину соответствующего критерия выражается в виде некоторой функции:

$$K = f(\{t_m\}) \quad (2)$$

Причем количество и состав параметров определяется отдельно для каждого конкретного случая оптимизации производства.

Для определения оптимального варианта реализации технологического процесса необходимо определить весовой критериальный коэффициент для каждого сравниваемого случая по формуле:

$$q_i = \prod_{j=1}^k k_{ij} \quad (3)$$

где q_i – весовой критериальный коэффициент для i -той конструкции инструмента;
 k_{ij} – коэффициент, зависящий от значений элементов a_{ij} и производственных условий.

$$k_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_{ij \max}} \lambda_j \quad (4)$$

где $a_{ij \max}$ – максимальное значение a_{ij} ; λ_j – коэффициент значимости j – того критерия.

Коэффициент значимости критерия λ назначается для усиления важности одного или нескольких параметров эффективности производства.

Совокупность значений коэффициентов значимости для каждого критерия является задаваемыми условиями производства. При этом значение коэффициента значимости критерия λ рационально принимать в диапазоне от 1 до 5, но он может быть увеличен в зависимости от особенностей исследуемого производства.

Например, в исследуемом технологическом процессе выделено пять критериев, определяющих эффективность производства: K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 . При задании условий производства указано, что необходимо обеспечить высокие показатели критериев K_1 и K_2 , считать неважным критерий K_3 , а критерии K_4 и K_5 должны быть средними. Тогда коэффициенты значимости критерия могут быть установлены следующими: для K_1 и K_2 – $\lambda_1 = \lambda_2 = 5$; для K_3 – $\lambda_3 = 1$; для K_4 и K_5 – $\lambda_4 = \lambda_5 = 2,5$.

При варьировании условий производства устанавливаются разные значения коэффициента λ . Примеры значений для разных условий представлены в табл. 1.

Результаты расчета весового критериального коэффициента сводятся в результирующий вектор:

$$q(q_i) = |q_1; q_2 \dots q_n| \quad (5)$$

Наибольшее значение весового критериального коэффициента свидетельствует о большей рациональности применения конструкции.

Возможные варианты значений коэффициента значимости критерия λ

| Условие | Коэффициент λ для критерия | | | | |
|---|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | K_5 |
| Условие 1: K_1, K_2 – высокая значимость; K_3 – незначимый критерий; K_4, K_5 – средняя значимость. | 5,0 | 5,0 | 1,0 | 2,5 | 2,5 |
| Условие 2: K_1 – высокая значимость; K_2, K_3, K_4, K_5 – незначимый критерий. | 5,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Условие 3: K_1 – незначимый критерий; K_2 – высокая значимость; K_3 – средняя значимость; K_4 – невысокая значимость; K_5 – весьма важный. | 1 | 4 | 3 | 2 | 5 |
| Условие 4: Средняя значимость всех критериев | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Сравнительный анализ технологий фрезерования композиционных материалов

В качестве примера проведем сравнительный анализ вариантов реализации технологического процесса для обработки стеклотекстолита марки СТЭФ-1. В данном технологическом процессе выделяются следующие критерии эффективности производства: работоспособность режущего инструмента T , качество обработанной поверхности R_{zp} , производительность обработки P и экономичность R_e . Каждый из критериев в общем виде можно представить в виде функций:

$$T = f(S_z, t, V, \sigma, HRA, E) \quad (6)$$

$$R_{zp} = f(S_z, D) \quad (7)$$

$$P = f(S_z, t, V, T) \quad (8)$$

$$R_e = f(S_z, t, V, T, C, z, P) \quad (9)$$

где T – период технологической стойкости режущего инструмента, мин; S_z = подача на зуб фрезы, мм/зуб; t – глубина резания, мм; V – скорость резания; σ – прочность инструментального и обрабатываемого материалов, МПа; HRA – твердость инструментального и обрабатываемого материалов; E – модуль упругости инструментального и обрабатываемого материалов, МПа; R_{zp} – высота микронеровностей после фрезерования, мм; D – диаметр фрезы, мм; P – производительность непрерывной обработки, мм³/мин; R_e – приведенные затраты, руб/мм³; C – стоимость инструмента, руб.; z – число режущих элементов.

При выборе рациональной конструкции инструмента в рамках данного исследования ограничимся варьированием материала режущей части.

Таким образом, сравниваемые фрезы имеют перетачиваемые режущие элементы из различных инструментальных материалов: ВКЗМ, ВК6ОМ, ВК2, ВК8, ВК15, Т5К10. Исходные данные представлены в табл. 2.

Расчет критериев производится по методикам, представленным в работах [16 – 20]. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Далее рассчитывается весовой критериальный коэффициент с учетом условий производства по формулам (3) и (4).

Рассмотрим 3 условия производства:

1. Обеспечить высокую работоспособность режущего инструмента и производительность обработки;
2. Обеспечить высокую экономичность производства;
3. Обеспечить высокое качество обработанной поверхности и среднюю экономичность обработки.

Таблица 2

Конструктивные параметры сравниваемых фрез

| Параметр 1 | Значение параметра 2 | | | | | |
|---|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Y ₁ | Y ₂ | Y ₃ | Y ₄ | Y ₅ | Y ₆ |
| Вариант технологии | Y ₁ | Y ₂ | Y ₃ | Y ₄ | Y ₅ | Y ₆ |
| Материал режущей части | ВК3М | ВК6ОМ | ВК2 | ВК8 | ВК15 | Т5К10 |
| Передний угол, γ , ° | 25 | | | | | |
| Задний угол, α , ° | 12 | | | | | |
| Диаметр резания, $D_{фр}$, мм | 250 | | | | | |
| Ширина резания, b , мм | 10 | | | | | |
| Предел прочности на сжатие, $\sigma_{сж}$, МПа | 4700 | 4900 | 3900 | 3910 | 2800 | 3000 |
| Количество зубьев, z | 2 | | | | | |
| Твердость, HRA | 91,0 | 90,5 | 91,5 | 88,0 | 86,0 | 88,5 |
| Стоимость фрезы, $C_{и}$, руб | 4500,00 | | | | | |

Продолжение Таблицы 2

| 1 | 2 | | | | | |
|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| Число смен режущих элементов, n_p | 50 | | | | | |
| Цена одного режущего элемента C_{pz} , руб. | 95 | 95 | 63 | 66 | 54 | 45 |
| Время на затачивание одного режущего элемента $t_{зп}$, мин | 1,5 | | | | | |
| Режимы резания | $S_z = 0,15$ мм/зуб; $t = 0,5$ мм; $n = 6000$ мин ⁻¹ | | | | | |
| Часовая ставка рабочего $C_{ч}$, руб/ч | 130 | | | | | |
| Модуль упругости инструментального материала, $E_{инстр}$, ГПа | 638 | 632 | 645 | 598 | 559 | 549 |

Таблица 3

Результаты расчета критериев производства

| Параметр | Значение параметра | | | | | |
|---|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Y ₁ | Y ₂ | Y ₃ | Y ₄ | Y ₅ | Y ₆ |
| Код конструкции | Y ₁ | Y ₂ | Y ₃ | Y ₄ | Y ₅ | Y ₆ |
| Период стойкости, T , мин | 189 | 201 | 126 | 115 | 53 | 63 |
| Производительность, P , мм ³ /мин | 8882 | 8889 | 8825 | 8809 | 8596 | 8656 |
| Высота микронеровностей, $R_{zр}$, мкм | 23 | | | | | |
| Приведенные затраты, $R_e \times 10^{-3}$, руб/мм ³ | 4,50 | 4,50 | 4,51 | 4,52 | 4,55 | 4,54 |

В первом условии устанавливаются следующие коэффициенты значимости критерия: для критерия работоспособности $\lambda_T = 5$; для критерия производительности $\lambda_P = 5$; для критериев экономичности и качества обработки $\lambda_{Re} = \lambda_R = 1$.

Во втором условии устанавливаются следующие коэффициенты значимости критерия: $\lambda_{Re} = 5$; $\lambda_T = 1$; $\lambda_P = 1$; $\lambda_R = 1$.

В третьем условии устанавливаются следующие коэффициенты значимости критерия: $\lambda_R = 5$; $\lambda_{Re} = 2,5$; $\lambda_T = 1$; $\lambda_P = 1$.

По результатам расчетов составляем матрицу смежности, принимая во внимание, что приведенные затраты и шероховатость поверхности должны иметь обратные значения:

$$M(a_{ij}) = \begin{matrix} & \begin{matrix} T & P & R_{zp} & R_e \end{matrix} \\ \begin{matrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \end{matrix} & \begin{matrix} 189 & 8882,5 & 0,043 & 222,2 \\ 201,5 & 8889,7 & 0,043 & 222,2 \\ 126,2 & 8825,1 & 0,043 & 221,7 \\ 115,6 & 8809,2 & 0,043 & 221,2 \\ 53,2 & 8596,1 & 0,043 & 219,8 \\ 63,0 & 8656,7 & 0,043 & 220,3 \end{matrix} \end{matrix} \quad (10)$$

По формуле (4) определяем коэффициент k_{ij} для каждого варианта технологии и всех критериев при различных условиях производства.

Таблица 4

Значения коэффициентов k_{ij}

| Критерий | | k_1 | k_2 | k_3 | k_4 | k_5 | k_6 |
|-----------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Условие 1 | Работоспособность | 4,69 | 5,0 | 3,13 | 2,87 | 1,32 | 1,56 |
| | Производительность | 5,0 | 5,0 | 4,96 | 4,95 | 4,83 | 4,87 |
| | Качество | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Экономичность | 1 | 1 | 1 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| Условие 2 | Работоспособность | 0,94 | 1,0 | 0,63 | 0,57 | 0,26 | 0,31 |
| | Производительность | 1 | 1 | 0,99 | 0,99 | 0,97 | 0,97 |
| | Качество | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Экономичность | 5,0 | 5,0 | 4,99 | 4,98 | 4,95 | 4,96 |
| Условие 3 | Работоспособность | 0,94 | 1,0 | 0,63 | 0,57 | 0,26 | 0,31 |
| | Производительность | 1 | 1 | 0,99 | 0,99 | 0,97 | 0,97 |
| | Качество | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 |
| | Экономичность | 2,5 | 2,5 | 2,49 | 2,49 | 2,47 | 2,48 |

Далее рассчитываем весовой критериальный коэффициент по формуле (3) для каждого варианта технологии и всех критериев при различных условиях производства. Полученные значения сводим в результирующий вектор:

| | | |
|--|---|--|
| $q(q_i) = \begin{vmatrix} 23,45 \\ 25 \\ 15,52 \\ 14,06 \\ 6,31 \\ 7,52 \end{vmatrix}$ | $q(q_i) = \begin{vmatrix} 4,7 \\ 5 \\ 3,11 \\ 2,81 \\ 1,25 \\ 1,49 \end{vmatrix}$ | $q(q_i) = \begin{vmatrix} 11,75 \\ 12,5 \\ 7,77 \\ 7,03 \\ 3,11 \\ 3,73 \end{vmatrix}$ |
|--|---|--|

Результаты расчетов показывают, что наиболее рациональным при разных условиях производства является вариант реализации технологического процесса Y_2 , у которого получено наибольшее значение q . Причем, согласно матрице смежности, режущий инструмент в варианте Y_2 , оснащенный сплавом ВК6ОМ, превосходит аналогичные конструкции режущих инструментов и по остальным критериям. Близкой по рациональности конструкцией является фреза в варианте Y_1 , имеющая режущие вставки из твердого сплава ВКЗМ.

Последующие этапы оптимизации технологических процессов возможны с использованием систем автоматизированного проектирования, способных за короткое время обработать большой объем информации. В этом направлении представляется дальнейшее развитие темы настоящего исследования.

Выводы

По результатам исследований можно сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Разработана методика сравнительного анализа вариантов реализации технологического процесса, которая позволяет оптимизировать производство деталей и производить оценку эффективности внедрения новых технологий на стадии проектирования.

2. Выявлены основные критерии, наиболее значимые для производства: работоспособность режущего инструмента, качество обработанной поверхности, производительность обработки и экономичность.

3. Одним из примеров реализации представленной методики является выбор материала режущей части фрезы для обработки композиционных материалов. Для различных условий производства по результатам сравнительного анализа рекомендуется применять твердый сплав марки ВК6ОМ, либо ВКЗМ.

Расчет критериальных показателей производства и проведение их сравнительной оценки с помощью средств автоматизации позволит в кратчайшие сроки создавать обоснованные рекомендации для различных условий производства, повысить экономическую эффективность и расширить область научных исследований обработки материалов.

Список литературы

1. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Кузнецов А.М. Новые конструктивные решения сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 153 – 157.
2. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Атомная визуализация алмазного резания // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 1. С. 137 – 149.
3. Попов В.Ю., Большаков И.М., Гуглин Г.С., Распутин Е.В. Исследование процесса засаливания алмазных шлифовальных кругов на металлической связке при обработке быстрорежущей стали Р6М5 // Механика XXI века. 2010. № 9. С. 101 – 104.

4. Янюшкин А.С., Архипов П.В. Атомно-молекулярные процессы в зоне алмазного круга и обрабатываемого материала // *Технология металлов*. 2010. № 1. С. 25-33.
5. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А. Технологические методы изготовления и выбора режущего инструмента для фрезерования композиционных материалов на полимерной основе // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. 2015. Т. 15. № 1. С. 35 – 46.
6. Рычков Д.А., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Формирование режущей кромки фрезерного инструмента для обработки слоистых композиционных материалов, армированных стеклянными волокнами // *Системы. Методы. Технологии*. 2014. № 2 (22). С. 42 – 46.
7. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. Исследование поверхности алмазных кругов после комбинированной электроалмазной обработки быстрорежущей стали // *Технология машиностроения*. 2013. № 11. С. 26 – 30.
8. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Батаев В.А., Архипов П.В., Медведева О.И. Исследования работоспособности алмазных кругов при обработке композиционных материалов // *Системы. Методы. Технологии*. 2010. № 7. С. 87 – 91.
9. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Ivancivsky V.V. Contact processes in grinding // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. № 788. P. 17 – 21.
10. Рычков Д.А., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Разработка технологии подготовки режущего инструмента для обработки слоистых композиционных материалов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2014. № 2 (63). С. 6 – 13.
11. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Петров Н.П., Рычков Д.А. Повышение эффективности обработки высокопрочных композиционных материалов // *Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки*. 2013. Т. 1. С. 146 – 149.
12. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В. Качество поверхности композиционного материала стеклотекстолит после фрезерования // *Инновационные технологии и экономика в машиностроении*. 2014. С. 343 – 347.
13. Рычков Д.А. *Технология механической обработки композиционных материалов: монография / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 232 с.*
14. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A. Automation tool preparation in the conditions of production // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. № 770. P. 739 – 743.
15. Рычков Д.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Критериальная оценка конструкции режущего инструмента на примере сборной фрезы для обработки композиционных материалов // *Главный механик*. 2011. № 5. С. 48 – 54.
16. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Методика сравнительного анализа конструкций сборного режущего инструмента // *Механики XXI века*. 2009. № 8. С. 120-123.
17. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Автоматизация технологической подготовки производства при выборе режущего инструмента // *Мир техники и технологий*. 2013. № 6. С. 36 – 38.
18. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Повышение производительности фрезерования на основе автоматизации проектирования сборного инструмента // *Системы. Методы. Технологии*. 2011. № 10. С. 91 – 94.
19. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В. Производительность непрерывной обработки резанием стеклонаполненных полимеров // *Системы. Методы. Технологии*. 2015. № 2 (26). С. 32 – 43.
20. Рычков Д.А. Определение периода стойкости режущего инструмента при фрезеровании стеклотекстолита // *Потенциал современной науки*. 2014. № 2. С. 48 – 52.

**METHODOLOGY OF CALCULATION OF CRITERIAL INDICATORS OF PRODUCTION
AT THE RATIONALIZATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF
PROCESSING OF DETAILS**

Yanyushkin A.S., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: yanyushkin@brstu.ru

Rychkov D.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e – mail: dielektrik84@mail.ru

Bratsk State University, 40 Makarenko, Bratsk, 665709, Russian Federation

Abstract

Increasing the efficiency of production is achieved by optimizing the technological process of processing parts. To do this, it is required to determine cutting modes, characteristics of cutting tools and equipment that are rational for specific production conditions. In this study, we present a methodology for a comparative analysis of options for the implementation of the technological process, which will allow to optimize the production of parts. The implementation of the methodology is presented by the example of a comparative analysis of the variants of the technological process of milling a composite material with variation of the material of the cutting part where several production conditions were considered. Based on the results of the analysis, recommendations on cutting conditions for individual processing cases were developed.

Keywords: comparative analysis, production efficiency, optimization.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ ПОЛИНОМИНАЛЬНОЙ СТОЙКОСТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ

*АНЦЕВ А. В. канд. техн. наук, доцент
(ТулГУ, г. Тула, Россия)*

Анцев А.В. – 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92,
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (ТулГУ),
е – mail: a.antsev@yandex.ru

Аннотация

Процесс износа режущего инструмента является случайным процессом. Разброс периода стойкости режущего инструмента негативно влияет на эффективность процесса резания, поэтому задача повышения точности прогнозирования периода стойкости инструмента, с учетом стохастической природы его износа является актуальной. Известные стойкостные зависимости могут быть использованы только в узких диапазонах изменения режимов резания, поэтому для оценки стойкости режущего инструмента предложено использовать полиномиальную стойкостную зависимость по скорости резания. Разработана методика выбора степени полиномиальной стойкостной зависимости и оценки ее параметров с использованием метода эволюционных вычислений.

Ключевые слова: стойкость, износ, режущий инструмент, стойкостная зависимость, полином, эволюционные вычисления.

Введение

Одной из важнейших задач современного машиностроения является повышение эффективности процесса резания на металлообрабатывающих станках. При этом повышение эффективности процесса резания – комплексная задача, состоящая из большого количества разных аспектов. Одним из таких аспектов является рациональное использование стойкостных ресурсов режущих инструментов.

При решении задачи рационального использования стойкостных ресурсов режущего инструмента необходимо учитывать тот факт, что износ режущего инструмента является случайной величиной, зависящей в основном от трех групп факторов: разброса режущих свойств инструментов; разброса свойств заготовок; стохастической природы самого процесса износа [1, 2]. Факторы первой группы, связанные с качеством инструментов, детерминировано действуют в течение периода стойкости инструмента и меняются при его замене. Факторы второй группы, связанные с колебанием размерных и прочностных параметров заготовок, действуют на протяжении времени обработки одной заготовки и изменяются при ее замене после окончания обработки. Факторы третьей группы действуют в процессе резания постоянно, например, из-за вибраций [3] или геометрических погрешностей станка [4]. Поэтому период стойкости режущего инструмента в настоящее время имеет достаточно широкий разброс – от 15 до 35 % [5], что оказывает негативное влияние на эффективность процесса резания [2, 5 – 7] вследствие:

– снижения эффективности использования ресурса режущего инструмента. Если время работы режущего инструмента определяется наихудшим экземпляром в партии, то ресурс наиболее стойких экземпляров режущего инструмента при фиксированной наработке будет использован не более чем на 65 %;

– снижения коэффициента использования металлорежущего оборудования и нарушения ритмичности производственного процесса изготовления продукции из-за увеличения вспомогательного времени, требуемого на обслуживание и замену режущего инструмента;

– повышения уровня риска при производственной реализации технологических проектных решений, существенно влияющих на качество изделий;

– повышения себестоимости продукции из-за включения в нее затрат на брак, связанный с отказом режущего инструмента во время обработки.

Для повышения эффективности процесса резания путем рационального использования стойких ресурсов режущих инструментов необходимо:

– повысить точность оценки периода стойкости режущего инструмента, учитывая стохастическую природу его износа путем выбора вида стойкостной зависимости и определения ее параметров;

– с использованием установленной стойкостной зависимости подобрать оптимальные режимы резания [8];

– оптимизировать режимы контроля, профилактического восстановления и замены режущего инструмента [9].

В данной работе рассмотрен вопрос выбора вида стойкостной зависимости и определения ее параметров.

Выбор вида стойкостной зависимости режущего инструмента

В литературе встречаются различные виды стойкостной зависимости, причем каждая из них имеет свои преимущества и недостатки [7]. Ни одна из приведенных в таблице стойкостных зависимостей не имеет убедительного физического обоснования. В узких диапазонах изменения режимов резания может быть использована любая из них при соответствующем подборе параметров.

Основные стойкостные зависимости

| Стойкостная зависимость | Автор | Год | Стойкостная зависимость | Автор | Год |
|---|---------------------|------|---|------------|------|
| $T = \frac{C_h}{v^\mu S^x h^y HB^z}$ | Тейлор | 1905 | $T = \frac{C_T}{e^{bV}}$ | Сафонов | 1933 |
| $T = \frac{C_T}{V^m + \frac{C_T}{T_n}}$ | Темчин | 1957 | $T = T_0 e^{\sqrt{H - \frac{1}{b^2} \ln^2(V/V_0)}}$ | Колдинг | 1958 |
| $T = \frac{C_T}{v^{b_0 + b_1 v}}$ | Ву | 1963 | $T = \frac{C_T}{v^\mu e^{aV}}$ | Грановский | 1963 |
| $T = 100 \cdot e^{\alpha(1-c)},$ $c = \sqrt{1 - b \cdot \ln(V/V_{100})}$ | Коняшов, Ксюнина | 1964 | $T = \frac{C_T - aV + bV^2}{V}$ | Метчизен | 1965 |
| $T = \frac{C_T}{e^{\frac{aV}{k}}}$ | Кениг | 1969 | $T = \frac{C_T}{(V + a)^m}$ | Кроненберг | 1971 |

Многие стойкостные зависимости практически удобны тем, что при переходе в логарифмическую систему координат они становятся линейными относительно своих параметров, что облегчает оценку данных параметров из опыта. Наибольшее распространение из этой группы стойкостных зависимостей получила тейлоровская (степенная) зависимость, которая легла в основу действующих

нормативов по расчету режимом резания. Недостатком тейлоровской (степенной) зависимости является то, что в логарифмической системе координат она не позволяет учесть горбообразный характер зависимости стойкости от режимов резания. Оставшиеся стойкостные зависимости учитывают горбообразный характер зависимости стойкости от режимов резания, но при переходе в логарифмическую систему координат не становятся линейными относительно своих параметров, что усложняет их применение.

Чтобы обеспечить линейность параметров стойкостной зависимости в логарифмической системе координат и одновременно учесть горбообразность зависимости стойкости от режимов резания, предлагается полиномиальная стойкостная зависимость по скорости резания

$$T = \frac{C_h \prod_{i=1}^N v^{\mu_i \cdot \ln^{i-1} v}}{S^x h^y HB^z},$$

где v – скорость резания; S – подача; h – глубина резания; HB – твердость; C_h , μ_i , x , y и z – параметры стойкостной зависимости (эмпирические константы), N – степень полинома по скорости резания.

При переходе в логарифмическую систему координат получаем

$$\ln T = \ln C_h + \sum_{i=1}^N (\mu_i \cdot \ln^i v) - x \ln S - y \ln h - z \ln HB$$

С учетом требуемого диапазона действия стойкостной зависимости и имеющейся статистической информации для оценки параметров стойкостной зависимости C_h , μ_i , x , y и z степень полинома N может быть увеличена или уменьшена.

При этом нужно учитывать, что разные степени полинома N в предложенной стойкостной зависимости являются наиболее точными в разных диапазонах изменения режимов резания, а параметры стойкостной зависимости C_h , μ_i , x , y и z не являются постоянными, хотя с достаточной точностью эти показатели можно принимать постоянными для конкретного обрабатываемого материала, геометрии и материала инструмента. В современных условиях хозяйствования такие допущения становятся экономически невыгодными, поэтому возникла задача идентификации полиномиальной стойкостной зависимости, заключающейся в выборе степени N полиномиальной стойкостной зависимости и определения параметров C_h , μ_i , x , y и z непосредственно в реальном производстве для конкретных условий обработки

Методика идентификации полиномиальной стойкостной зависимости по скорости резания с учетом стохастичности процесса износа

Выбор степени N полиномиальной стойкостной зависимости для конкретных производственных условий предлагается осуществлять по следующему алгоритму (рис. 1).

Сначала происходит накопление статистической информации по износу режущего инструмента и его периоду стойкости в процессе обработки при определенных технологическим процессом режимах резания (блок 1). В зависимости от возможностей технологического оборудования и производственной ситуации накопление статистической информации может проходить в режиме реального времени при обработке детали, после окончания обработки детали, после обработки группы деталей, после определенного периода времени или после отказа режущего инструмента.

Далее выбирается несколько вариантов степеней полиномиальной зависимости. Для каждого варианта степени N полиномиальной зависимости по накопленной статистической информации рассчитываются параметры C_h , μ_i , x , y и z таким образом, чтобы средний квадрат разности между опытным значением стойкости режущего инструмента и рассчитанным по формуле с предложенными параметрами для всех опытных значений был минимален (блок 2).

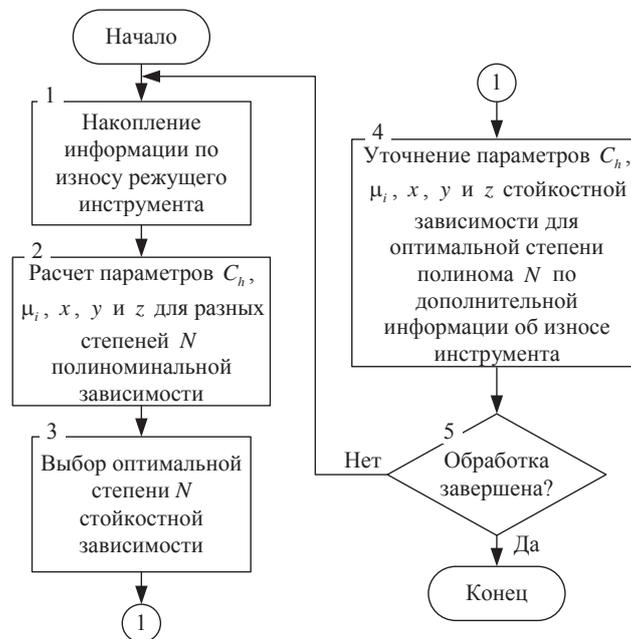


Рис. 1. Итерационный алгоритм выбора степени N полиномиальной стойкостной зависимости

В блоке 3 выбирается степень N полиномиальной зависимости, которая обеспечивает наиболее точное соответствие опытным данным. Для этого все варианты степеней испытываются с рассчитанными параметрами C_h , μ_i , x , y и z на дополнительной статистической информации, полученной при тех же производственных условиях. При этом по новой статистической информации вычисляется среднеквадратическое отклонение для всех вариантов степеней и выбирается та степень, при которой среднеквадратическое отклонение окажется минимальным. После этого параметры полиномиальной стойкостной зависимости выбранной степени N можно уточнить исходя из статистической информации, полученной объединением статистической информации, используемой для расчета параметров стойкостной зависимости, и статистической информации, используемой для выбора степени N полиномиальной зависимости, обеспечивающей минимальное среднеквадратическое отклонение.

Если нет возможности получить дополнительную статистическую информацию, то исходную статистическую информацию разбивают на две части. Первую часть используют для предварительного получения параметров для каждого варианта степени полиномиальной стойкостной зависимости, а вторую часть используют для выбора степени N полиномиальной зависимости, которая обеспечивает наиболее точное соответствие опытным данным. Степень точности соответствия опытным данным оценивается по величине среднеквадратического отклонения на второй части статистической информации. Окончательно степень стойкостной зависимости и ее параметры определяется по всей имеющейся статистической информации.

Данный процесс постоянно повторяется по мере накопления новой статистической информации. При этом самые ранние данные можно исключать из расчета для повышения точности оценки (режим «скользящего окна»).

Расчет параметров C_h , μ_i , x , y и z стойкостной зависимости предлагается проводить методом эволюционных вычислений (рис. 2) [10].

В блоке 1 происходит формирование вариантов параметров C_h , μ_i , x , y и z полиномиальной стойкостной зависимости. Количество формируемых вариантов параметров задается в настройках алгоритма. Формирование варианта параметров стойкостной зависимости заключается в их генерации случайным образом в пределах заданного диапазона возможных значений.

После этого происходит оценка оптимальности каждого варианта параметров по имеющейся статистической информации (блок 2). Оценка оптимальности варианта параметров стойкостной зависимости состоит в расчете среднеквадратического отклонения по методу наименьших квадратов. Чем меньше среднеквадратическое отклонение, тем данный вариант параметров лучше.

В блоке 3 начинается основной цикл эволюционного алгоритма. Основной цикл выполняется пока не будет достигнута необходимая точность подбора параметров стойкостной зависимости или пока не будет достигнуто заданное максимальное время работы алгоритма. Если среди сгенерированных в блоке 1 вариантов параметров стойкостной зависимости окажется вариант, удовлетворяющий требованиям по точности, то основной цикл пропускается и происходит переход к блоку 9.

В основном цикле эволюционного алгоритма происходит выбор определенного количества лучших вариантов параметров (блок 4). Эти варианты будут использоваться в качестве точек, рядом с которыми будет происходить поиск значений параметров стойкостной зависимости. Для этого выбранные параметры меняются случайным образом в незначительных пределах вблизи текущих значений (блок 5). Кроме этого генерируется определенное количество дополнительных новых вариантов параметров стойкостной зависимости с целью найти еще более точные варианты чем были сгенерированы ранее (блок 6).

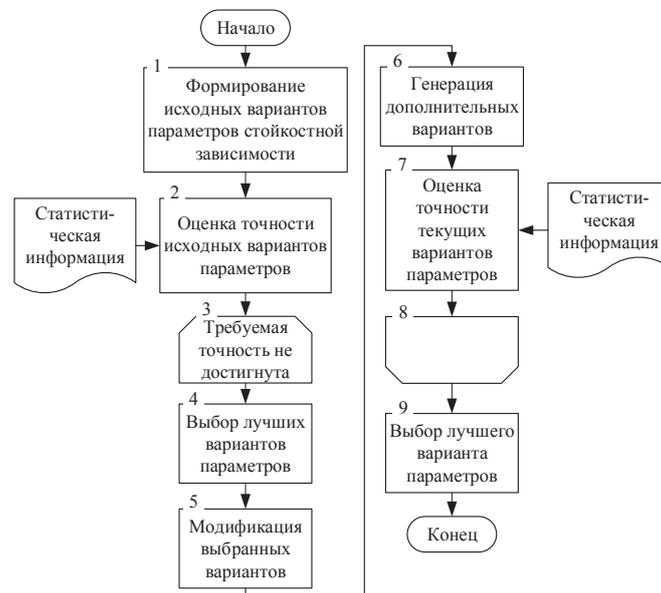


Рис. 2. Алгоритм расчета параметров стойкостной зависимости методом эволюционных вычислений

Варианты параметров стойкостной зависимости, полученные в блоке 5 и в блоке 6, объединяются и происходит оценка их точности по статистической информации (блок 7). Если достигнута необходимая точность, то основной цикл эволюционного алгоритма завершается и среди текущих вариантов параметров стойкостной зависимости выбирается вариант, описывающий статистические данные с минимальным значением среднеквадратического отклонения (блок 9). В противном случае выполнение цикла продолжается.

Практическая реализация предложенной методики выбора степени N полиномиальной стойкостной зависимости и расчета параметров C_h , μ_i , x , y и z предполагает:

- анализ способов контроля износа режущего инструмента на металлорежущем оборудовании;
- автоматизацию сбора статистики о периоде стойкости режущего инструмента на станках с ЧПУ;
- разработку информационной системы для сбора статистики о периоде стойкости режущего инструмента на уровне цеха или предприятия;
- разработку системы выбора оптимальной степени полиномиальной стойкостной зависимости и оценки ее параметров.

Выводы

Одним из путей повышения эффективности процесса резания является рациональное использование стойкостных ресурсов режущих инструментов. Для этого требуется повысить точность прогнозирования периода стойкости режущего инструмента с учетом стохастической природы процесса износа. Известные стойкостные зависимости имеют свои преимущества и недостатки, поэтому для прогнозирования периода стойкости режущего инструмента предлагается использовать полиномиальную стойкостную зависимость. Для выбора степени полиномиальной зависимости и оценки ее параметров предложена соответствующая методика. Внедрение данной методики на машиностроительных предприятиях повысит точность прогнозирования периода стойкости режущего инструмента и позволит улучшить эффективность промышленных технологий производства продукции машиностроения.

Список литературы

1. Анцев А.В., Анцева Н.В., Кривицкий И.В. Использование нечеткой логики для повышения эффективности промышленных технологий // КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ: КОНТРОЛЬ, УПРАВЛЕНИЕ, ПОВЫШЕНИЕ, ПЛАНИРОВАНИЕ: сборник научных трудов Международной молодежной научно-практической конференции (17-18 ноября 2015 года) / редкол.: Павлов Е.В. (отв. ред.); В 2-х томах, Т.1. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т., ЗАО «Университетская книга», 2015. С 46 – 49.
2. Antsev A.V. The generalized mathematical model of the failure of the cutting tool / N.I. Pasko, A.V. Antsev, N.V. Antseva, V.P. Fyodorov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 177 (2017) 012052.
3. Erenkov O.Yu., Ivakhnenko A.G., Kozlova M.A. Analysys of turning process by modeling of technological system oscillations // Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения. Материалы междунар. науч.-техн. конф., Комсомольск-на-Амуре, 12-16 мая 2015 г. редкол.: О.Ю. Еренков (отв. ред.) и др. 2015. С. 93 – 96.
4. Анিকেева О.В., Ивахненко А.Г. Моделирование образования погрешностей расположения поверхностей при обработке деталей на токарных станках. // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. Материалы VIII Международной научно-технической конференции: в 2 частях. Ответственный редактор: Е.И. Яцун. Курск, 2011. С. 304 – 308

5. Мартинов Г.М., Григорьев А.С. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование их остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки // СТИН. 2012. №12. С. 23 – 27.
6. Васин С.А., Иноземцев А.Н., Анцев В.Ю. Информационная инфраструктура технологической подготовки производства // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2004. № 6. С. 32 – 44.
7. Анцев А.В. Обобщенная стохастическая модель отказов режущего инструмента и ее применение / Н.И. Пасько, А.В. Анцев, Н.В. Анцева [и др.]. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 174 с.
8. Иноземцев А.Н., Пасько Н.И., Анцев А.В. Автоматизированное управление режимами резания металлорежущих станков с использованием самообучающихся систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 12-1. С. 40 – 49.
9. Пасько Н.И., Анцев А.В. Оптимизация планово-предупредительной замены режущего инструмента по данным об износе и наработке // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 5-2. С. 257 – 265.
10. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия Телеком, 2006. 452 с.: ил.

PREDICTION OF A CUTTING TOOL LIFE BASED ON THE POLYNOMIAL TOOL – LIFE EQUATION

Antsev A.V., Candidate of technical science, Associate Professor, e – mail: a.antsev@yandex.ru

Tula State University, 92, Lenina Ave., Tula, 300012, Russia

Abstract

The wear process of the cutting tool is a random process, depending mainly on three groups of factors: the dispersion of the cutting properties of tools, dispersion of the properties of work piece and stochastic nature of the wear process itself. The dispersion of the cutting tool life negatively affects the efficiency of the cutting process, therefore the task of increasing the accuracy of prediction of the tool-life, taking into account the stochastic nature of its wear, is actual problem. The known tool-life equations can be used only in narrow ranges of variation in cutting modes, therefore, it is proposed to use the polynomial tool-life equation of cutting speed to evaluate the cutting tool life. It allows to take into account the hump-shaped form of the dependence of tool-life on the cutting modes and at the same time it becomes linear in its parameters in a logarithmic coordinate system. For the choice of degree of the tool-life equation, a method has been developed. The method has an iterative nature that allows to react on changes in the manufacturing situation. Estimates of the coefficients of the tool-life equation are proposed to be carried out by the method of evolutionary computations.

Keywords: tool-life, wear, cutting tool, tool-life equation, polynomial, evolutionary computations.

УДК: 621.9.047

МОДЕРНИЗАЦИЯ СТАНКА МОДЕЛИ ЗБ632В ДЛЯ ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

*КРАСИЛЬНИКОВ Б. А., канд. техн. наук, профессор,
ЛЕОНТЬЕВ И. А., инженер,
РАХИМЯНОВ К. Х., канд. техн. наук, доцент
ПРОСКУРИН Р. С., магистрант 2 года,
ГОЛОВКО Н. В., магистрант 2 года
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Леонтьев И.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: leontev@corp.nstu.ru

Аннотация

Рассмотрены вопросы модернизации станка ЗБ632В для использования метода электроалмазного шлифования для заточки твердосплавного инструмента. Представлены конструктивные решения для подвода технологического тока к элементам системы, электроизоляции инструмента и обрабатываемой детали, подачи электролита в зону обработки. Модернизация привода перемещения стола позволила реализовать диапазон подач, характерный для электроалмазного шлифования. Показано, что использование источника технологического тока до 200 А позволяет обеспечить производительность до 850 мм³ / мин.

Ключевые слова: модернизация станка, твердый сплав, электроалмазное шлифование.

Введение

Сложность обработки инструмента, оснащенного твердым сплавом, заключается в чрезвычайно высокой твердости и хрупкости материалов, из которых они изготовлены [1 – 3]. Наиболее производительным методом обработки твердого сплава является глубинное электроалмазное шлифование (ЭАШ) [4 – 8]. Для реализации метода ЭАШ требуется создание нового или модернизация существующего оборудования. С экономической точки зрения очевиден выбор в пользу модернизации существующих станков [9, 10].

Модернизация станка под метод электроалмазного шлифования заключается в разработке и оснащении его системой подвода напряжения к вращающемуся алмазному кругу и обрабатываемой детали. Для этого необходимо выполнить электрическую развязку частей станка, связанных со шпинделем, с алмазным кругом от стола с деталью. Для реализации метода ЭАШ необходимо оснащение станка источником постоянного тока для подведения технологического напряжения (8 ... 12 В).

Конструкция станка

Настоящая статья посвящена модернизации станка модели ЗБ632В для возможности глубинного электроалмазного шлифования.

Станок ЗБ632В предназначен для ручной заточки и доводки алмазными кругами режущего инструмента, оснащенного твердым сплавом. На рис.1 представлен общий вид станка.

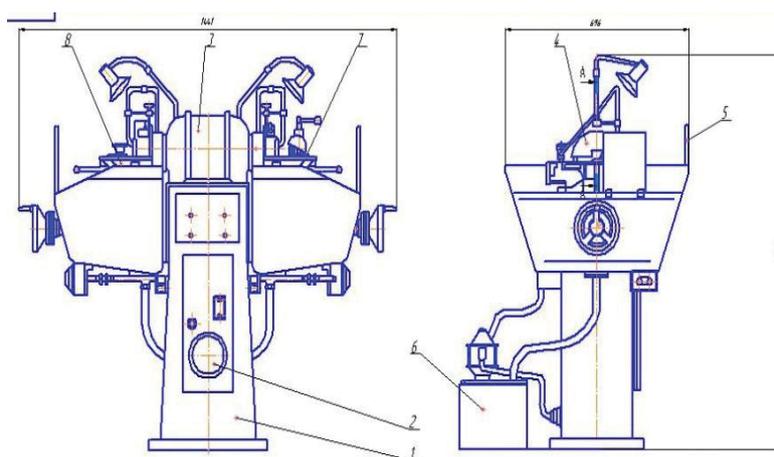


Рис. 1. Общий вид станка 3Б632В:

- 1 – станина станка; 2 – электрошкаф; 3 – электродвигатель – вал является шпинделем станка;
4 – круг алмазный с защитным кожухом; 5 – короб – поддон;
6 – система подачи СОЖ; 7 – столик для установки приспособлений крепления инструмента;
8 – осциллирующий подручник

Основная часть станка – головка (рис. 2), представляющая собой двухскоростной электродвигатель 1, вал 2 которого является двухсторонним шпинделем станка и имеет на концах конические поверхности для установки оправок 3 для крепления алмазных кругов 4, 5 гайками 6. Оправки на валу – шпинделе крепятся гайками 7. Вал шпинделя вращается в подшипниках, закрепленных крышками 8.

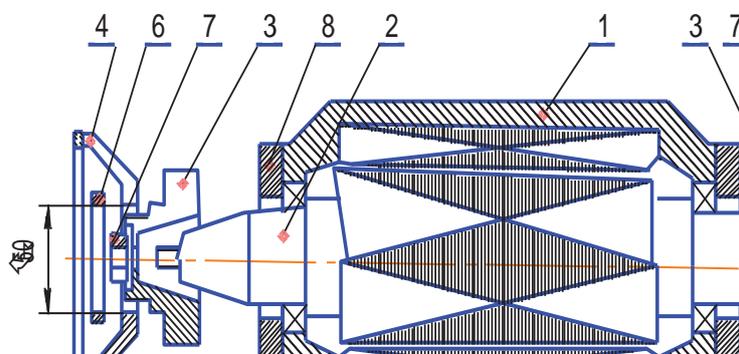


Рис. 2. Головка станка 3Б632В

Для электроалмазного шлифования могут быть использованы алмазные круги на металлической связке М1 12А2 – 45(АЧК) 150x20хх32. Посадочное отверстие растачивается до 50 мм для установки на оправку крепления алмазного круга на станке.

Приспособление для закрепления обрабатываемого инструмента устанавливается на столик 1 подручника 2 станка (рис. 3). Подручник станка соединен с кареткой 3 двумя пластинчатыми пружинами 4, которые позволяют вручную совершать подручнику осциллирующие движения в плоскости перпендикулярной оси шпинделя. Каретка по цилиндрическим направляющим 5 может перемещаться параллельно оси шпинделя с помощью винтовой пары 6, обеспечивающей подачу на круг с точно

стью 0,01 мм по лимбу 7. Столик может поворачиваться относительно плоскости торца шлифовального круга на угол от -10° до $+20^{\circ}$ с отсчетом угла поворота с помощью транспортира 8.

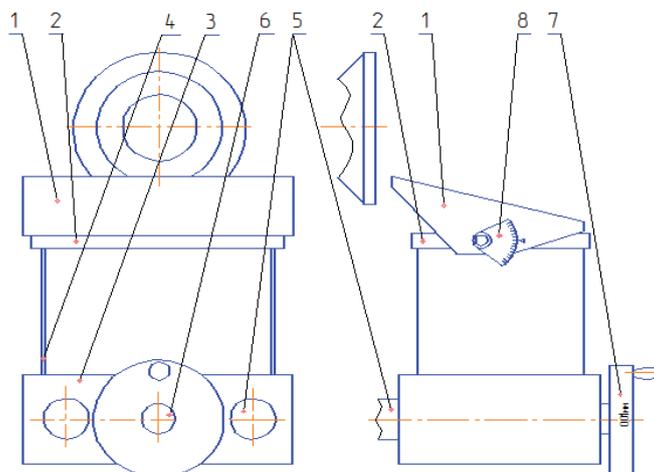


Рис. 3. Подручник со столиком на каретке

Модернизация станка

При данной конструкции станка целесообразно электрическую развязку провести изоляцией обрабатываемой детали от частей станка.

Для подвода напряжения к шпинделю разработано и изготовлено контактно-щеточное устройство (рис. 4). Устройство имеет корпус 1 с радиальными пазами, в которые установлены медно-графитовые щетки 2. Выпадению щеток препятствует крышка 3. Корпус щеточного устройства крепится к крышке 4 электродвигателя 5. Щетки прижимаются к жестко закрепленной на шпинделе ступице 6 крепления шлифовального круга, кольцевой пружиной 7. Шлифовальные круги 8 на ступицу крепятся с помощью зажимной гайки 9.

Контактно – щеточное устройство позволят проводить обработку с токами до 600 ампер.

Электроалмазное шлифование проводится при малых скоростях подачи. Станок не имеет механизированной подачи детали, что требует оснащение его механизмом подачи.

На станке установлен механизм подачи – перемещения подручника со столиком (рис. 5). Механизм имеет линейный электромеханический привод с двигателем постоянного тока на 24 вольта 1, шток 2 которого соединен вилкой 3 с подручником 4 станка. Электромеханический привод установлен в кронштейне 5 на коробе-поддоне 6 станка. Вилка и кронштейн дают возможность приводу качаться в плоскости подручника, что позволяет проводить подвод-отвод каретки станка 7 с подручником к обрабатываемому инструменту.

Установленный привод подачи обеспечивает подачу в пределах 15 ...75 мм/мин при ходе до 75 мм. Величину хода можно устанавливать настройкой конечных выключателей электромеханического привода

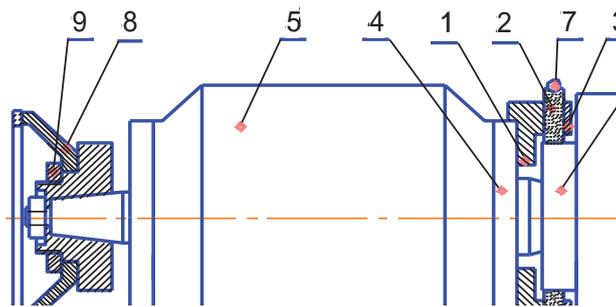


Рис. 4. Контактно – щеточное устройство

Для электрической изоляции обрабатываемого инструмента на столик станка 8 установлена текстолитовая изолирующая плита 9, на которую крепятся приспособления 10 для крепления обрабатываемого инструмента. Технологическое напряжение подводится непосредственно к приспособлению. Станок оснащен системой подачи и очистки электролита с баком емкостью 60 литров. Внутри бака установлены перегородки, выполняющие роль отстойника для исключения попадания продуктов ЭАШ в зону обработки.

Электроалмазное шлифование проводится с одной стороны шпинделя, а контактно – щеточное устройство установлено на противоположном конце шпинделя, что защищает контактно – щеточное устройство от попадания электролита.

Для предохранения разбрызгивания электролита за пределы зоны обработки последняя оборудована защитным кожухом 11, выполненным из прозрачного материала (оргстекла) (рис. 5).

Станок имеет источник технологического тока с током 200 ампер, что позволяет производить обработку твердого сплава с производительностью до 850 мм³/мин.

На рис. 6 представлен общий вид модернизированного станка (со снятой крышкой защитного кожуха).

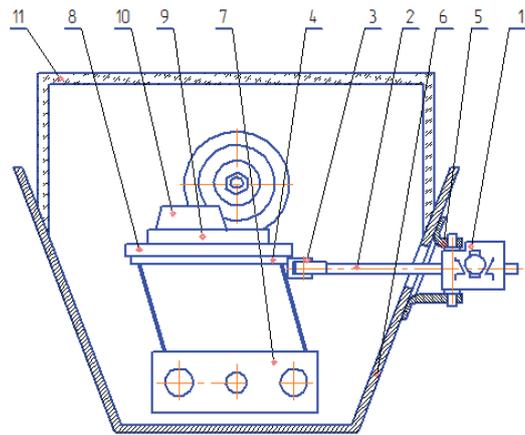


Рис. 5. Механизм перемещения и защитный кожух



Рис. 6. Общий вид (фото) модернизированного станка 3Б632В

Выводы

Модернизация станка модели 3Б632В для электроалмазного шлифования позволит производить обработку инструмента, оснащенного твердым сплавом с производительностью до 850 мм³/мин при высоком качестве обработанной поверхности.

Список литературы

1. Исхакова Г.А., Марусина В.И., Рахимьянов Х.М. Определение микротвердости частиц карбида вольфрама, полученных в искровом разряде // Порошковая металлургия. 1987. № 10. С. 87 – 89.
2. Марусина В.И., Исхакова Г.А., Рахимьянов Х.М. Фазовый и гранулометрический состав карбидов, образующихся при электроэрозионной обработке // Порошковая металлургия. 1992. № 10. С. 61 – 64.
3. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В., Красильников Д.Б. Электрохимическая обработка безвольфрамовых твердых сплавов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2010. № 3. С. 3 – 7.
4. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н. Электроалмазная обработка напыленных износостойких покрытий // В сборнике: Инженерия поверхностного слоя деталей машин труды Международной научно – практической конференции. Министерство образования и науки Российской Федерации, Кузбасский государственный технический университет, Белорусский национальный технический университет, Под редакцией В.Ю. Блюменштейна, Ф.И. Пантелеенко. 2009. С. 365 – 368.
5. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимьянов К.Х. Точность формообразования при электроалмазной прорезке пазов в аморфных и нанокристаллических сплавах // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2006. № 2. С. 32 – 33.
6. Рахимьянов Х.М., Рахимьянов К.Х., Гаар Н.П. Активация анодного растворения аморфных и нанокристаллических сплавов непрерывным обновлением поверхности // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2010. № 1. С. 35 – 38.
7. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимьянов К.Х., Никитенко М.И. Электроалмазное шлифование твердого сплава ВК8 // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2010. № 3. С. 9 – 13.
8. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Никитенко М.И., Богаев А.А. Исследование производительности электроалмазной обработки жаропрочного сплава ЖС6 и твердого сплава ВК8 // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2007. № 3. С. 8 – 10.
9. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимьянов К.Х., Еремина А.С. Модернизация оборудования для электроалмазного шлифования изделий из аморфных и нанокристаллических сплавов // Обработка металлов. – 2012. - № 3 (56). – С. 37 – 39.
10. Проскурин Р.С., Герасимов Н.В., Рахимьянов Х.М. Электроалмазная обработка специального твердосплавного инструмента // В сборнике: НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ сборник научных трудов: в 9 частях. 2016. С. 323 – 325.

**MODERNIZATION OF THE MACHINE MODEL 3Б632В FOR
ELECTROCHEMICAL GRINDING**

Krasilnikov B.A., C.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: krasilnikov@corp.nstu.ru

Rakhmyanov K. Kh. C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e – mail: raximyanov@corp.nstu.ru

Leontyev I.A., Engineer, e – mail: leontev@corp.nstu.ru

Proskurin R.S., Master of 2 years

Golovko N.V., Master of 2 years

Novosibirsk State Technical University, prospekt K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The problems of modernization of the machine model 3Б632В for sharpening the carbide tool by electrochemical grinding are considered. Constructive solutions for electric current supply to the elements of the system, the electrical insulation of the tool and the workpiece, the supply of electrolyte to the processing zone are presented. The modernization of drive for moving the table allowed realizing the range of feedings which are characteristic for electrochemical grinding. It is shown that the use of a technological current source up to 200 A makes it possible to provide a capacity of processing up to 850 mm³ per min.

Keywords: modernization of the machine, carbide tool, electrochemical grinding.

УДК 625.143.482

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СВАРКИ РЕЛЬСОВ АЛЮМИНОТЕРМИТНЫМ СПОСОБОМ

*ИЛЬИНЫХ А. С., доктор техн. наук, доцент,
ГАЛАЙ М. С., канд. техн. наук,
СИДОРОВ Э. С., аспирант
(СГУПС, г. Новосибирск, Россия)*

Сидоров Э.С. – 630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191,
Сибирский государственный университет путей сообщения,
е – mail: sesnsk@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты исследования распределения температурных полей возникающих при сварке рельсов алюминотермитным способом, проведенных с использованием системы компьютерного моделирования процессов литья LVMFlow. Приведен анализ процесса охлаждения металла в области сварного соединения, при выполнении сварки рельсов алюминотермитным способом. В результате моделирования получены термограммы, на которых отображено распределение тепла в области рельсового стыка в процессе его охлаждения. Определены значения температуры металла головки рельса сварного шва при выполнении операций послесварочной обработки.

Ключевые слова: рельсы, алюминотермитная сварка, сварной шов, компьютерное моделирование, LVMFlow, кривые охлаждения, термограммы.

Введение

Уровень качества сварных соединений рельсов в значительной степени зависит от точности соблюдения параметров технологического процесса сварки. Способ контактной электросварки рельсов, получивший наиболее широкое распространение на сети железных дорог России, позволяет обеспечивать стабильно высокое качество рельсовых стыков за счет точного контроля режимов сварки. Однако, данный способ получения сварных соединений не может быть использована при сварке рельсов в зоне стрелочных переводов, рельсовых пересечений и в кривых малого радиуса. В таких зонах применяют алюминотермитную сварку [1, 2].

Для получения рельсовых стыков алюминотермитным способом сварки не требуется использование сложного дорогостоящего оборудования. Сварное соединение образуется в результате заливки расплавленного металла, полученного в результате термитной реакции, в литейную форму, закрепленную на соединяемых рельсах, установленных с зазором 25 мм [3, 4]. Удаление литейной формы, излишков металла и механическая обработка головки рельса в области сварного соединения после сварки производится с помощью переносного оборудования, приводимого в действие автономным гидроагрегатом. Таким образом, при выполнении сварки рельсов алюминотермитным способом отсутствует необходимость в затратах электроэнергии, не требуются продолжительные перерывы в движении поездов [5].

Следует отметить, что алюминотермитный способ сварки рельсов изучен в меньшей степени, чем способ контактной электросварки. Поэтому проведение исследований направленных на определение оптимальных условий сварки и послесварочной обработки в настоящее время актуально. Одним из направлений исследований является оценка влияния температурного воздействия на процесс

формирования физико-механических свойств металла в области сварных соединений рельсов во время сварки и при выполнении послесварочной механической обработки головки рельса. В результате проведенных исследований установлено, что выполнение технологической операции шлифования, формирующей необходимый профиль головки рельса после сварки, может приводить к изменению твердости металла сварного шва. Наибольшая твердость обработанной поверхности сварного стыка достигается, когда начало выполнения операции по шлифованию соответствует температуре металла поверхности катания 850°C или 600°C .

Определение температуры металла в зоне алюминотермитных сварных соединений рельсов, оценка её изменения в процессе сварки и последующей механической обработки затруднено, т. к. заливаемый металл, имеющий высокую температуру ($2300\dots 2800^{\circ}\text{C}$) [6] может повредить температурные датчики. Кроме того, литейная форма не позволяет установить датчики в процессе кристаллизации или использовать бесконтактный способ измерения. Произвести оценку изменения температуры металла в области алюминотермитных сварных соединений возможно с помощью компьютерного моделирования.

Описание теоретических исследований

Для исследования процесса охлаждения металла в зоне рельсовых соединений, полученных алюминотермитным способом сварки, с помощью САПР «КОМПАС-3D» были созданы трехмерные модели. Эти модели использовались для работы с системой компьютерного моделирования процессов литья LVMFlow. Высокая точность вычислений при моделировании обеспечивалась за счет малого размера ячеек разностной сетки, равного 1 мм.

Литейная форма предназначена для удерживания жидкого присадочного металла в области будущего сварного соединения. После завершения процесса кристаллизации, длительность которого составляет 180...220 с., производят демонтаж сварочного оборудования и удаление формы с излишками металла, что занимает 420...440 с. Таким образом, через 600...660 с. охлаждение металла в области сварного соединения происходит уже без формы. Поэтому для обеспечения высокой точности результатов моделирования было создано две модели сварных соединений.

Модель № 1 состоящая из двух рельсов, сварного шва, литейной формы, литников и приливной части предназначена для моделирования процесса кристаллизации и охлаждения металла сварного соединения до момента удаления формы и излишков металла (рис. 1).

Модель № 2 состоящая из двух рельсов и сварного шва позволяет производить оценку изменения температуры металла без литейной формы.

Измерение температуры металла сварного шва при моделировании процесса охлаждения алюминотермитного сварного стыка производилось с помощью датчика, установленного на глубине 2...3 мм от поверхности катания в середине сварного шва (рис. 2). На первом этапе была произведена оценка распределения тепла расплавленного металла сварного шва от момента начала заливки его в литейную форму до момента завершения выполнения операций удаления формы и излишков металла. Вторым этапом заключался в определении температуры металла сварного шва при выполнении операций послесварочной обработки сварного соединения: срезания грата и шлифования головки рельса.

При моделировании были приняты следующие начальные условия:

1) Для моделирования охлаждения сварного шва с литейной формой (Модель № 1):

- марка стали – М76;
- материал формы – кварцевый песок;
- температура заливаемого металла – 2500°C ;
- температура рельсов и литейной формы 850°C .

2) Для моделирования охлаждения сварного шва без литейной формы (Модель № 2):

- марка стали – М76;
- температура металла сварного шва – 1500°C ;

- температура соединяемых рельсов – 1200° С.

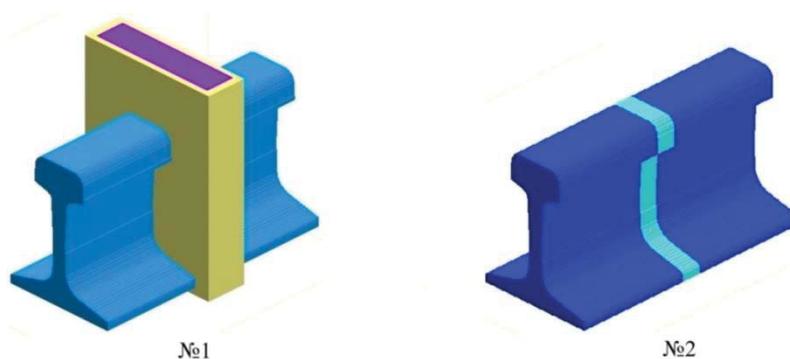


Рис 1. Трехмерные модели LVMFlow



Рис 2. Место установки датчика в головке рельса сварного шва

Результаты и обсуждение

В результате компьютерного моделирования процесса охлаждения металла алюминотермитного сварного соединения получен график отображающий изменение температуры на датчике, установленном в сварном шве (рис 3). После заполнения полости литейной формы присадочным металлом, имеющим температуру 2500° С, наблюдается интенсивное снижение температуры за счет отвода тепла в свариваемые рельсы и через 60...120 секунд температура металла сварного шва составляет 1800...1700° С. Далее скорость охлаждения значительно снижается из-за наличия в прибыльной части большого количества металла с высокой температурой, которая препятствует охлаждению головки рельса в области сварного шва. После удаления прибыльной части с литейной формой через 600...660 с относительно времени завершения заполнения формы интенсивность охлаждения вновь повышается. Таким образом, снятие излишков металла с головки рельса сварного шва с помощью гратоснимателя производят при температуре металла 1500...1000° С, а шлифование поверхности катания и боковых граней головки рельса при 900...700° С.

Кроме измерения температуры с помощью установки датчиков, компьютерное моделирование позволяет графически отобразить распределение тепла по сечению в процессе охлаждения на термограммах, представленных на рисунке 4. Снимок 1 соответствует точке отсчета моделирования процесса охлаждения, литейная форма полностью заполнена жидким металлом, температура которого составляет 2500° С. На термограммах 2 - 4 можно наблюдать как тепло от залитого металла передается в свариваемые рельсы, нагревая их, при этом температура головки рельса в области будущего сварного шва остается достаточно высокой (1400...1500° С) за счет тепла, отдаваемого металлоприбыльной части. После снятия формы и удаления излишков металла охлаждение головки рельса в зоне сварного шва происходит более интенсивно, что видно на снимках 5 – 8.

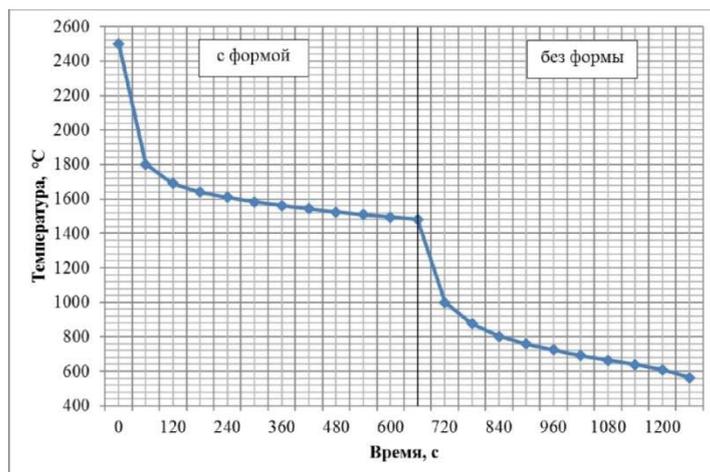


Рис. 3. Изменение температуры металла поверхности катания сварного шва

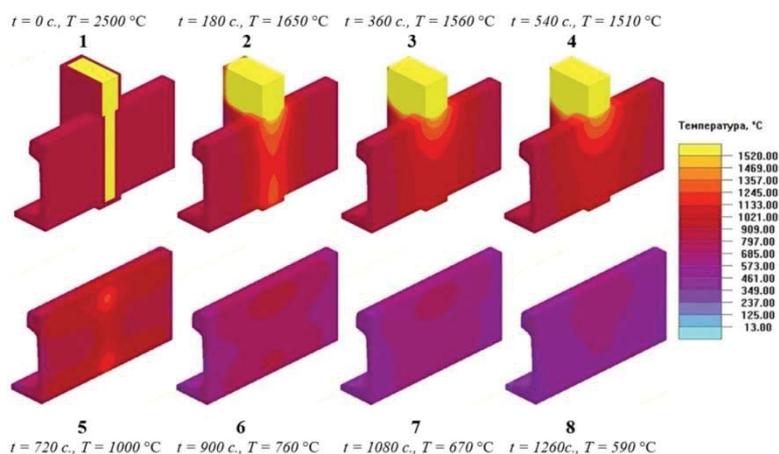


Рис. 4. Распределение температуры по сечению сварного соединения

Выводы

В результате проведенного исследования установлена зависимость температуры металла сварного шва от времени, относительно момента начала заливки металла в форму. Полученные результаты могут быть использованы для определения в условиях железнодорожного пути времени, через которое будет достигнута температура, позволяющая обеспечить наиболее высокую твердость металла сварного шва в результате выполнения операции шлифования.

Список литературы

1. Шур Е.А. Повреждения рельсов / Е.А. Шур. – М.: Интекст, 2012. – 192 с.
2. Тихомирова Л.Б., Ильиных А.С., Галай М.С., Сидоров Э.С. Влияние нормализации на структуру и механические свойства алюминотермитных сварных соединений рельсов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 1 (70). – С. 60-66.

3. ТУ 0921–127–01124323–2005. Сварка рельсов алюминотермитная методом промежуточного литья. Технические условия. – Введ. 01.04.2005. – М.: ФГУП ВНИИЖТ, 2005. – 27 с.
4. Тихомирова Л.Б., Ильиных А.С., Галай М.С., Сидоров Э.С. Исследование структуры и механических свойств алюминотермитных сварных соединений рельсов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2016. – Т. 16. – С. 90-95.
5. Пасько С.В., Тихомирова Л.Б., Болотова О.В. Алюминотермитная сварка рельсов методом промежуточного литья по технологии фирмы «СНАГА»: учебное пособие. – Новосибирск: Изд – во СГУПС, 2010. – 99 с.
6. ИТ 0921–001–59033294–2005. Технология алюминотермитной сварки рельсов методом промежуточного литья фирмы «СНАГА». Инструкция технологическая. – Введ. 01.04.2005. – М.: ЗАО «СНАГА», 2005. – 30 с.

THE MODELING PROCESS OF COOLING METAL DURING ALUMINOTHERMIC WELDING OF RAILS

Ilinykh A.S., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: asi@stu.ru
Galay M.S., Ph.D. (Engineering), Associate, e – mail: galayms@mail.ru
Sidorov Je.S., Ph.D. student, e – mail: sesnsk@mail.ru

Siberian Transport University, 191 Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

Abstract

The article is devoted to research of the cooling process of aluminothermic rail welding joints. The study of heat distribution is performed by using the system computer modeling LVMFlow. With the models of the rail joints was obtained the cooling curve of weld metal. It is found that the casting shape hinder cooling of aluminothermic welded joint. Removing the shape entails increasing of cooling rate. Using weld shears occurs when the temperature of the metal is 1000...1500 °C. Rough grind the weld perform when the temperature of the metal running surface is 900...700 °C. The analysis of the thermograms of simulation model is given.

Keywords: rails, aluminothermic welding, rails joints, computer modeling, LVMFlow, cooling curves, thermal image.

УДК 621.9.025

**ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЕ ЛЕЗВИЕ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА,
ПОЛУЧЕННОЕ СВЕРХСКОРОСТНЫМ ЗАТАЧИВАНИЕМ**

*ПОПОВ А. Ю. доктор техн. наук, профессор,
РЕЧЕНКО Д. С., канд. техн. наук, доцент
(ОмГТУ г. Омск, Россия)*

Попов А.Ю. – 644050, г. Омск, пр. Мира, 11,
Омский государственный технический университет,
e – mail: popov_a_u@list.ru; rechenko-denis@mail.ru

Аннотация

Достижение требуемой точности деталей из труднообрабатываемых материалов, применяемых в современной технике ВПК, зачастую является весьма сложной задачей, а иногда практически невыполнимой без применения доводочных операций. Известно, что любые доводочные операции являются дорогостоящими, низкопроизводительными, требующими высокой квалификации рабочих, специального оборудования и приспособлений, что значительно удорожает изготовление деталей. Исключение доводочных операций из технологического процесса возможно лишь при обеспечении требуемого качества обработки лезвийным инструментом. Проблема заключается в том, что современный металлорежущий инструмент не способен обеспечить требуемое качество обработки, вследствие его недостаточной остроты. В статье рассмотрены результаты повышения точности финишной обработки высокоточных деталей из труднообрабатываемых материалов ключевых узлов за счет применения высококачественного лезвия твердосплавного инструмента, полученного сверхскоростным шлифованием.

Ключевые слова: качество, сверхскоростное затачивание, металлорежущий инструмент.

Введение

К деталям двигателя самолета предъявляется целый ряд особых требований, обусловленных надежностью их работы на определенный срок службы. В числе важнейших требований: высокая точность размеров деталей (допуск на размер достигает в несколько микрометров); высокое качество обработанных поверхностей, включая состояние поверхностного слоя; минимальные сроки производства с целью обеспечения максимальной производительности выпуска готовой и годной продукции. Особенностью технологий изготовления авиационных деталей является нежелательность операций шлифования между лезвийными и полировальными операциями.

В настоящее время необходимым условием для обеспечения заданной точности размеров и формы, а также требуемого качества обработки деталей двигателя самолета является применение полировальных операций. При этом данные операции выполняются преимущественно вручную, что обуславливает их дороговизну и значительно увеличивает время на изготовление. Операции полирования и доводки могут занимать 50 – 60 % всего времени на изготовление и направлены, прежде всего, на снижение микронеровностей обрабатываемых поверхностей и получение требуемых окончательных размеров. При этом переход современных авиационных двигателей на использование моноколес, значительно увеличивает трудоемкость полировальных и доводочных операций.

Существенным недостатком применения операций полирования и доводки на предприятиях является их низкая производительность и требование высокого профессионального уровня рабочего

Уменьшение зависимости, от применения данных операций возможно лишь обеспечивая требуемую окончательную точность и качество обработки лезвийным инструментом на существующем металлорежущем оборудовании. Наряду с этим, проводятся исследования направленные на оптимизацию режимов лезвийной обработки, полирования и доводки, а также направленные на оптимизацию характеристик существующих полировальных паст и абразивного инструмента. Специальных отечественных и зарубежных разработок, направленных на создание лезвийного инструмента, позволяющего обеспечивать окончательные размеры и качество обработки на существующем металлорежущем оборудовании, до настоящего времени не проводилось.

Целью работы является: получение высококачественного лезвия твердосплавного инструмента сверхскоростным затачиванием для исключения доводочных операций при изготовлении авиационных деталей. В работе решались задачи: создание сверхскоростного шлифовально-заточного станка ВЗ-326Ф4; затачивание лезвия твердосплавного инструмента на различных режимах; определение качества заточенного инструмента с применением растровой микроскопии.

Описание теоретических или экспериментальных исследований

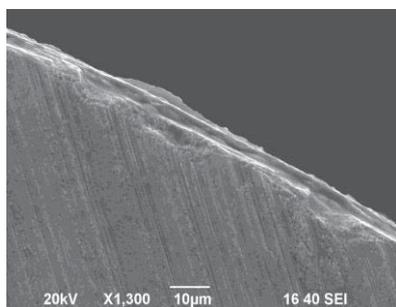
Для исключения полировальных операций на деталях авиационной техники, как от формообразующих операций, нужно на существующем оборудовании, существующими типами лезвийных инструментов и инструментальными материалами получить точность и шероховатость практически окончательно. В этом случае полирование как процесс, будет выполнять свои основные функции, то есть гарантированно улучшать шероховатость обработанной поверхности. Полирование сейчас выполняет не свойственные функции, за счет этой операции срезают припуск десятками долей миллиметра и осуществляют непрерывный процесс замера и контроля. Например, лопатки турбин после ленточного шлифования доводят вручную на полировальных бабках, что значительно снижает производительность труда и качество готовой продукции. Повысить производительность труда можно за счет применения высококачественного лезвия инструмента, но этот инструмент не может работать на жестких режимах, предельные режимы обработки не превышают по глубине резания 0,1 мм, а подача – 0,05...0,08 мм/об при точении и 0,03...0,05 мм/зуб при фрезеровании. При этом силы резания и шероховатость получается на порядок ниже, по сравнению с классическими режимами обработки на чистовых операциях. Поэтому нужно добавить финишную операцию, а после применять полирование только для ликвидации шероховатости. При этом никаким подбором паст и характеристик абразивного инструмента невозможно существенно снизить трудоемкость.

На современных авиационных предприятиях назрела необходимость создания технологии производства деталей авиационной техники, позволяющая снизить трудоемкость их изготовления, с применением финишных операций на существующем оборудовании и существующим лезвийным инструментом, при использовании операций полирования только для снижения шероховатости. Проблема состоит в том, что применяемый металлорежущий инструмент не способен осуществлять финишные операции при глубинах резания в пределах нескольких микрометрах, в силу недостаточной его остроты. Для осуществления финишной лезвийной операции с глубиной резания до 10 мкм необходима острота лезвия металлорежущего инструмента менее 1...2 мкм. При этом при других параметрах лезвия получить гарантированно качественную обработку невозможно.

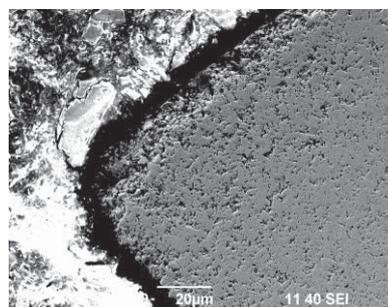
Высококачественное лезвие металлорежущего инструмента в настоящее время получают различными методами – доводка, электроалмазное шлифование, затачивание мелкозернистыми кругами и т.д., но эти методы низко производительные и не позволяют гарантированно получать стабильный результат, а также получение инструмента сложного профиля, с винтовыми поверхностями достаточно сложно и трудоемко. Существует метод сверхскоростного затачивания с применением традиционных схем затачивания и формообразующих движений, что не потребует разработки ни новых типов инструментов, ни нового типа оборудования. Поэтому данный метод сверхскоростного затачивания позволит вписаться в существующие технологии изготовления металлорежущего инструмента с высококачественным лезвием [1 – 3]. Классические методы и режимы затачивания с применением доводочных операций позволяют получать лезвие с остротой не менее 5...6 мкм (рисунок 1). Обработка

производилось при режимах затачивания $V = 30$ м/с, $S = 1 \dots 1,5$ м/мин и $t = 0,01$ мм/дв. ход, что позволяет получать лезвие с остротой $5 \dots 10$ мкм.

Исследования проводились на растровом электронном микроскопе Jeol JCM-5700.



а) – передняя поверхность



б) – поперечное сечение лезвия

Рис. 1. Лезвие твердосплавного режущего инструмента, полученное при классическом затачивании с применением доводочной операции

Рентгеноструктурный анализ приведен на рис. 2 и в таблице 1.

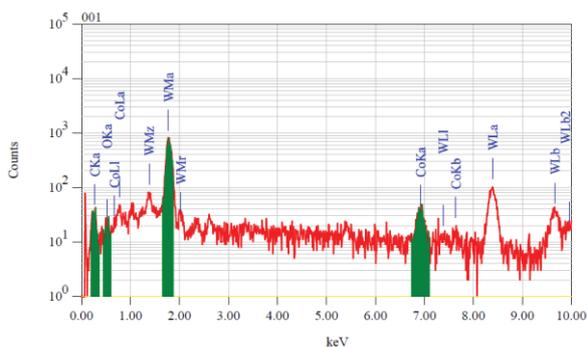


Рис. 2. Результаты рентгеноструктурного анализа твердосплавной пластины

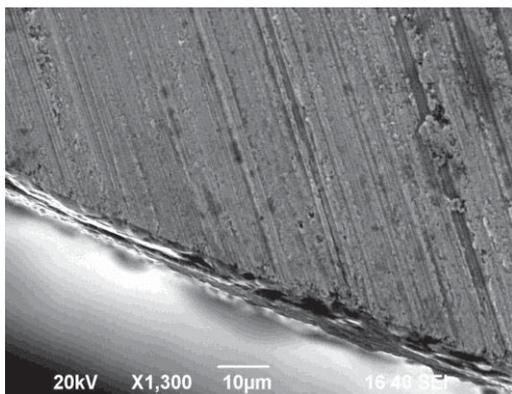
Таблица 1

Значения элементного анализа

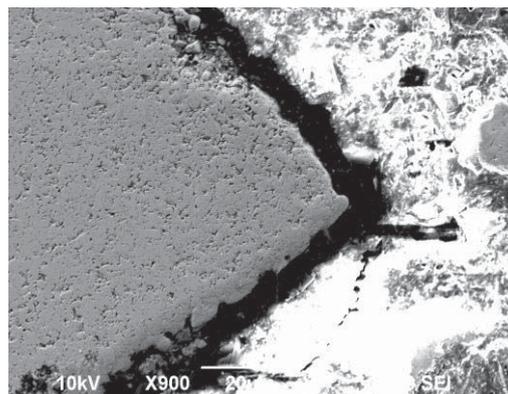
| Element | Mass % | Error % | Atom % |
|--------------|---------------|---------|--------|
| C | 18.77 | 0.45 | 71.16 |
| O | 2.25 | 0.47 | 6.39 |
| Co | 5.49 | 0.33 | 4.24 |
| W | 73.49 | 0.34 | 18.20 |
| Total | 100.00 | | |

Из табл. 1 видно, что содержание WC (карбид вольфрама) составляет порядка 92 %, а Co (кобальт) порядка 5,5 % и O (кислород) порядка 2,3 % что свидетельствует об образовании окислов на поверхности твердого сплава. Изменение химического состава говорит о возникновении высоких температур и возможно сил резания при затачивании.

Сверхскоростной метод затачивания при режимах затачивания $V = 350$ м/с, $S = 1 \dots 1,5$ м/мин и $t = 0,01$ мм/дв. ход позволяет получать лезвие с остротой $1 \dots 2$ мкм (рис. 3).



а) – передняя поверхность



б) – поперечное сечение лезвия

Рис. 3. Лезвие твердосплавного режущего инструмента, полученное при сверхскоростном затачивании

Рентгеноструктурный анализ приведен на рис. 4 и в табл. 2.

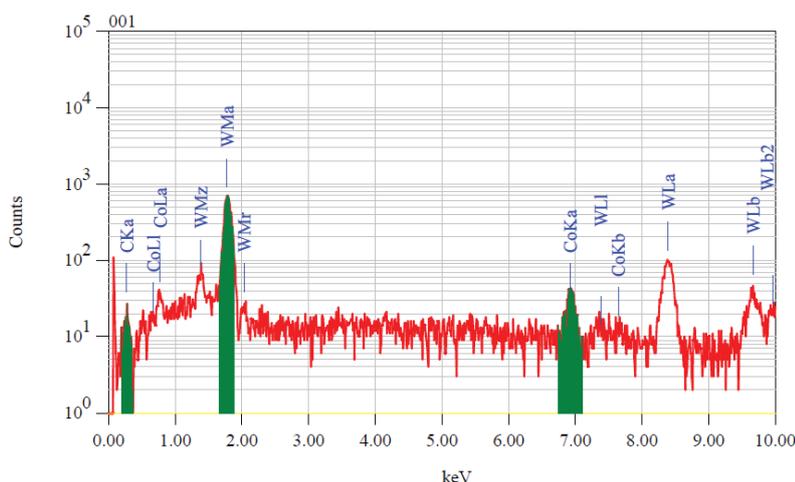


Рис. 4. Результаты рентгеноструктурного анализа твердосплавной пластины

Таблица 2

Значения элементного анализа

| Element | Mass % | Error % | Atom % |
|--------------|---------------|---------|--------|
| C | 14.84 | 0.44 | 69.86 |
| Co | 6.06 | 0.32 | 5.82 |
| W | 79.09 | 0.33 | 24.32 |
| Total | 100.00 | | |

Из табл. 2 видно, что содержание WC (карбид вольфрама) составляет порядка 94 %, а Co (кобальт) порядка 6 %, что соответствует исходному составу и состоянию сплава GC1105 (*Sandvik Coromant*). При этом на проверяемой поверхности не наблюдается оксидов.

Результаты и обсуждение

В таблице 3 приведены сравнительные характеристики качества затачивания.

Параметры поверхности и качества затачивания

| Параметр | Значение, полученное при классическом затачивании | Значение, полученное при сверхскоростном затачивании |
|--------------------------|---|--|
| Среднее значение | 3,496 | 0,350 |
| Максимальное значение | 5,105 | 0,393 |
| Минимальное значение | 1,910 | 0,323 |
| Радиус округления лезвия | 8...10 | 0,8...2 |

Выводы

По проведенным исследованиям видно, что при высокоскоростном затачивании твердосплавной пластины качество лезвия и обработанных поверхностей режущего клина значительно выше. При классических режимах затачивания острота лезвия составляет 5...10 мкм, а при высокоскоростном затачивании составляет 1...2 мкм, при этом на обработанных поверхностях отсутствуют следы окислов.

Список литературы

1. Иванова Т.Н. Процесс деформирования поверхностного слоя при шлифовании / Т.Н. Иванова // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Сборник научных трудов. 2009. - №37. – С. 80 – 83.
2. Потапов В.А. Высокоскоростная обработка. / В.А. Потапов, Г.И. Айзеншток; М.: - 1986. – 60 с.: ил.
3. Худобин Л.В. Пути совершенствования технологии шлифования. / Л.В. Худобин. Саратов: Приволж. кн. изд-во, 1969. – 216 с.

**THE BLADE IS HIGH QUALITY CARBIDE TOOLS, THE OBTAINED
HIGH – SPEED SHARPENING**

Popov A.Yu., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: popov_a_u@list.ru

Rechenko D.S., Ph.D. (Engineering), Associate, e – mail: rechenko-denis@mail.ru

Omsk state technical University, 11 Prospect Mira, Omsk, 644050, Russian Federation

Abstract

Achievement of the required precision parts from hard materials used in modern technology, military-industrial complex, is often very difficult and sometimes virtually impossible without the use of finishing operations. It's known that any finishing operations are costly, inefficient, require high skilled workers, special equipment and devices, which significantly increases the cost of manufacturing parts. The exception of finishing operations from the process is only possible while ensuring the required quality of machining cutting tool. The problem is that modern cutting tool is not able to provide the required quality of processing, due to its lack of sharpness. In the article the results of improving the accuracy of finishing of precision parts from hard materials of key components through the use of high-quality blades, carbide tools, obtained high-speed grinding.

Keywords: quality, super-fast sharpening, metal cutting tool.

УДК 620.192.4

ВЛИЯНИЕ СВАРОЧНО – НАПЛАВОЧНЫХ РАБОТ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ СТАЛИ

*ТОКАРЕВ А. О., доктор техн. наук, доцент,
МИРОНЕНКО И. Г., доктор техн. наук, доцент,
ФЕДОТОВА Е. С., аспирант
(СГУВТ г. Новосибирск, Россия)*

Токарев А.О. – 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33,
Сибирский государственный университет водного транспорта,
е – mail: aot51@ngs.ru

Аннотация

Дан анализ причин поломок валов, собранного сваркой, восстановленного, подвергнутого воздействию случайной дуги.

Установлено, что поломки произошли вследствие инициирования трещин различными дефектами сварки: несплавления сварного шва с основным металлом, кратеры в начале и конце швов, подрезы, наплывы, поры. Фактором, способствующим распространению трещин, которые вызвали непровары, явилось наличие закалочных структур в зоне термического влияния сварного шва. Трещины, возникшие на поверхностях разделки сварного шва, распространяются в направлении наибольших механических напряжений, двигаясь по границам дендритных зёрен сварного шва. Предложены меры по предупреждению дефектов сварки, это сварка конструкционной улучшаемой стали в предварительно подогретом состоянии и последующий отжиг.

Метод магнитной памяти металла (ММП – контроль) позволяет обнаруживать внутренние дефекты сварного шва, являющиеся концентраторами напряжений (непровары, поры, шлаковые включения, микротрещины) в силу малости их размеров, не обнаруживаемые другими широко известными и традиционными методами неразрушающего контроля;

ММП – контроль может быть классифицирован, как метод ранней диагностики зарождающихся дефектов.

Ключевые слова: усталостное разрушение, микротрещина, сварной шов, микроструктура, зона термического влияния сварки, дефекты сварки, метод магнитной памяти металла.

Введение

Сварочно – наплавочные работы являются одним из самых распространенных способов изготовления и ремонта деталей на речном флоте и других видах транспорта, а также в строительстве, сельском хозяйстве, горно – металлургической промышленности и других видах монтажных и ремонтно – восстановительных работ. При этом сварочное производство – весьма ответственный технологический процесс, требует высокой квалификации исполнителя и строгой технологической дисциплины. Несоблюдение технологии наплавки и сварки часто приводит к последующему аварийному повреждению сваренных или восстановленных наплавкой деталей.

Целью данной работы явилось исследование характерных видов повреждений деталей судовой техники, изготовленных с применением сварочных технологий, а также восстановленных методами наплавки при судоремонте, для определения и предупреждения типичных причин, вызывающих аварии.

Материалы и методика экспериментального исследования

Анализ выполнялся на валах судового движительно – рулевого комплекса, претерпевших аварийное разрушение при эксплуатации. Для выявления внутренних дефектов типа несплошностей применялась ультразвуковая дефектоскопия. Для поиска зон концентрации напряжений (ЗКН), вызванных искажением кристаллической решётки материала сварного шва, был использован метод магнитной памяти металла (ММП – контроль) ГОСТ Р ИСО 24497 – 2 – 2009 (Общие требования) и ГОСТ Р ИСО 24497 – 3 – 2009 (Контроль сварных соединений). Методика исследований достаточно подробно описана в работе [1], физическая сущность метода – в работах [2, 3].

В обнаруженных местах зон концентрации напряжений (ЗКН) вырезали образцы для микроструктурных исследований. Структуру выявляли травлением 5% раствором азотной кислоты в спирте.

Результаты и обсуждение

В навигационный период 2016 года произошло разрушение вертикальных валов винторулевых колонок (ВРК) на четырёх теплоходах смешанного плавания типа «река – море». Вертикальные валы сломались, отработав несколько месяцев с момента постройки, то есть с минимальной наработкой.

Вертикальный вал ВРК представляет собой полый цилиндр и конструктивно состоит из цилиндрической части (2), изготовленной из углеродистой стали 35, с приваренным к ней в средней части фланцем (3), и двух оконечных частей в виде шлицевых втулок (1), выполненных из стали 42ХМ (рис. 1).

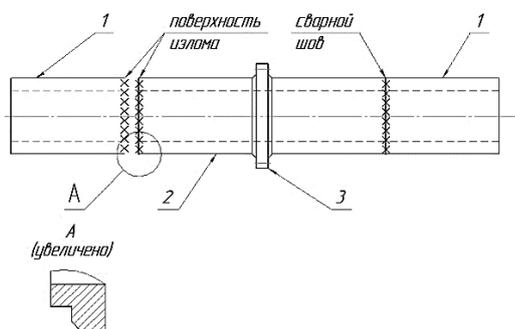


Рис. 1. Эскиз и фото поломки вертикального вала винто – рулевой колонки судна

Ниже описан характерный случай. В ходе эксплуатации произошёл срез верхней шлицевой втулки по сварному шву с вертикальным валом.

Учитывая внезапность поломок при незначительной наработке, встала задача – определить причину разрушения верхнего сварного шва и оценить техническое состояние нижнего сварного шва с определением возможности ремонта вала и дальнейшей эксплуатации.

Поиск зон концентрации напряжений (ЗКН), вызванных искажением кристаллической решётки материала, произвели методом магнитной памяти, который сводится к поиску участков детали, имеющих скачкообразное изменение напряжённости собственного магнитного поля. В результате сканирования и анализа магнитограмм выделены два основных участка ЗКН (рис. 2):

- верхний участок вертикальных валов ВРК – ЗКН расположены в районе поверхности излома разрушенного сварного шва;

-
- нижний участок вертикальных валов ВРК – ЗКН расположены в околошовной зоне (зоне термического влияния) неразрушенного сварного шва.

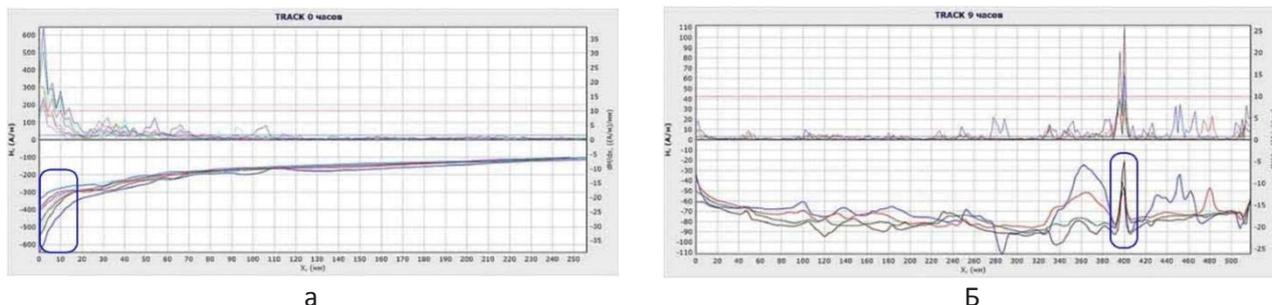


Рис. 2. Характерные графики распределения поля H_p по образующим, вдоль поверхности вертикальных валов ВРК:
а – верхний участок вала; *б* – нижний участок вала

Местом возникновения микротрещин являются зоны несплавления (или непровара) в корне сварного шва (рис. 3). При дальнейших исследованиях в местах ЗКН, определённых с помощью магнитограмм, были обнаружены такие дефекты как: непровары, микротрещины, поры, шлаковые включения (рис. 4).

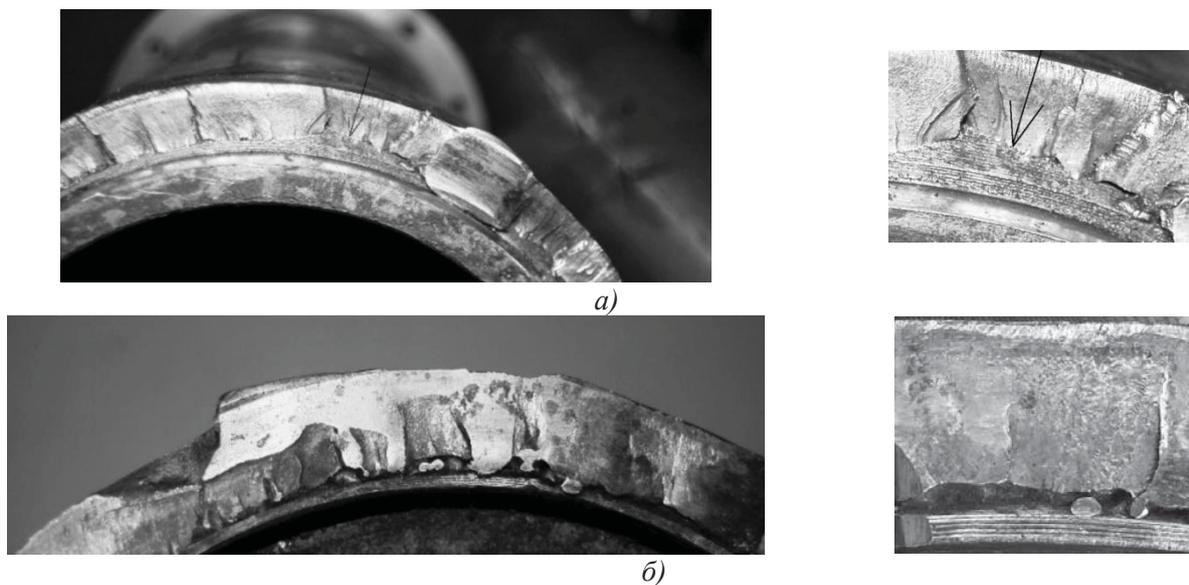


Рис. 3. Наружный вид поверхности разрушения: *а* – вала; *б* – шлицевой втулки

В зоне сплавления металла сварного шва со сталью 42ХМ, а также в зоне термического влияния сварного шва обнаружены участки с мартенситной закалочной структурой. Микротвёрдость этих участков составляет 754 HV.

Проведённые исследования позволяют представить следующую схему процесса поломки валов (рис. 5). Микротрещины возникают в местах несплавления материала сварного шва. Непровары обнаруживаются как по поверхности разделки втулки, так и на поверхности разделки трубы. Повышение механических напряжений при образовании микротрещин приводит к изменению направления их распространения от поверхности непровара (несплавления) в сторону наибольших напряжений. Распространению трещин способствует закалочная структура, полученная в результате сварки без подогрева, а также дендритное строение металла сварного шва [4]. Непровар (несплавление) металла сварного шва в корне соединения является, таким образом, опасным, недопустимым дефектом, вызывающим образование трещин.



Рис. 4. Макроструктура и микротрещины в сечении неразрушенного сварного соединения

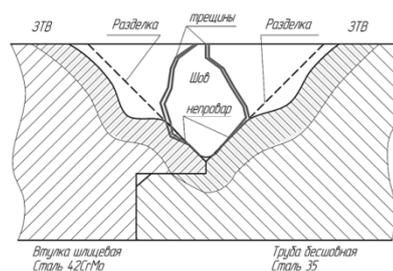


Рис. 5. Схема возникновения и распространения трещин в сварном соединении вала ВРК

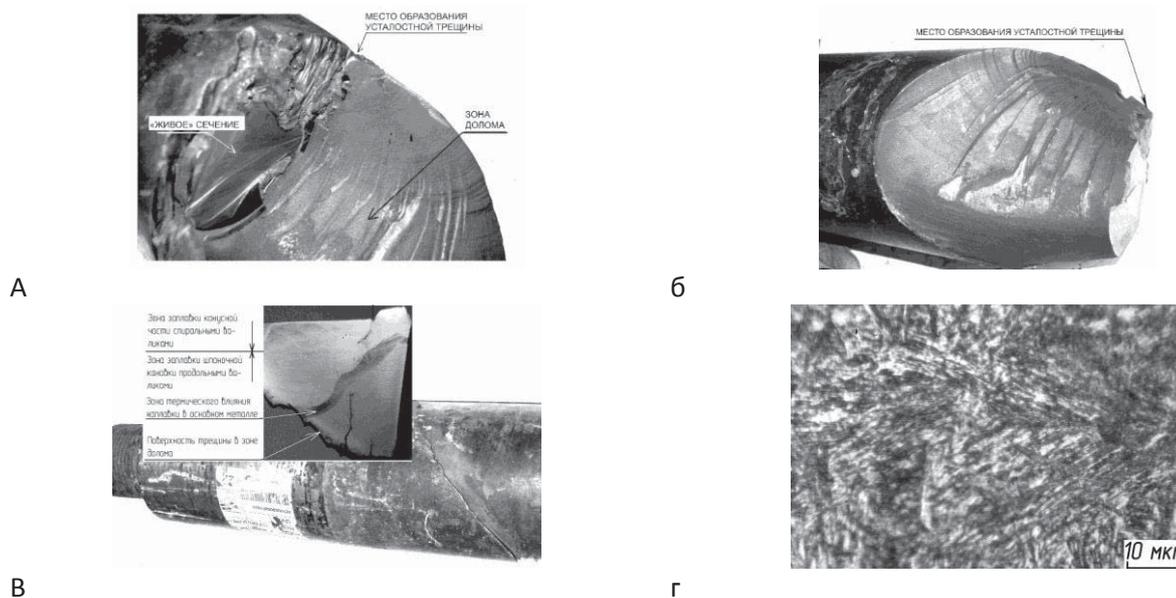


Рис. 6. Усталостное разрушение гребного вала теплохода типа «Волго – Нефть»: а – фрагмент гребного вала со стороны полумуфты; б – фрагмент гребного вала со стороны гребного винта (повёрнуто 180°); в – макроструктура в сечении, прилегающего к поверхности разрушения; г – микроструктура зоны термического влияния ЗТВ

Гребной вал теплохода «Волго – Нефть 142» диаметром 210 мм вышел из строя вследствие усталостного повреждения в первую навигацию после его восстановления методом наплавки. Усталостная трещина, разрушившая вал, прошла по посадочной конической части вала, распложенной под полумуфтой, которая соединяла гребной вал с промежуточным валом валопровода судна. Далее трещина вышла на цилиндрическую часть вала, где произошло её раскрытие и скручивание сохранившейся части сечения в направлении действующего момента сил. В ходе обследования вал был полностью разрезан на две части. Из прилегающего к трещине сечения были вырезаны образцы для микроструктурного анализа (рис. 6).

В плоскость шлифа, вырезанного по прилегающему к трещине сечению (рис. 6в), закономерно попал заплывший при ремонте конец шпоночной канавки, выполненный в виде ложки. Судя по макроструктуре, канавка была заплывлена продольными проходами, толщиной по 4 – 5 мм. Строение стали в зоне термического влияния ЗТВ сварного шва представляет собой продукт распада мартенсита (рис. 6г).

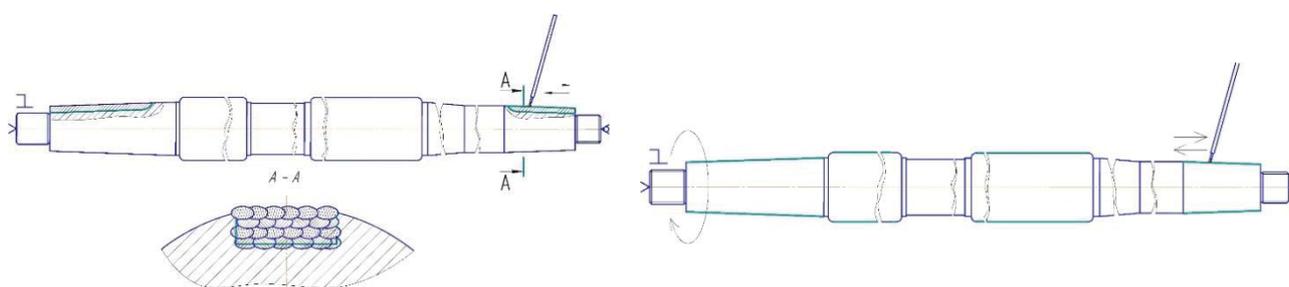


Рис. 7. Операционные эскизы технологического процесса восстановления посадочного места гребного вала:
а – заправка шпоночной канавки; б – наплавка конуса

Мартенсит – структура закалки образовался при наплавке первого слоя в результате ускоренного охлаждения. Высокая скорость охлаждения вызвана интенсивным теплоотводом в объём холодного металла основы. То есть, в нарушение технологии наплавка производилась на холодный вал без его предварительного подогрева. После заполнения и механической обработки канавки наплавлялась посадочная поверхность конуса четырьмя проходами при вращении вала (рис. 7). Каждый из последующих слоёв наплавки являлся отжигающим для предварительно наплавленных. В результате произошёл отпуск мартенсита.

На основании данных выполненных исследований следует, что причиной усталостного разрушения гребного вала явилось нарушение технологии наплавки при ремонте. Наплавка была произведена без подогрева вала. В результате в зоне термического влияния сварного шва произошёл нагрев с последующим ускоренным охлаждением за счёт теплоотвода в холодную основу. Результатом такого термического цикла явилась закалка в ЗТВ и в нижних слоях наплавки. В результате закалки возникли микротрещины. Отжигающий эффект при наплавке последующих слоёв обеспечивает отпуск закалочных структур, однако не освобождает сталь от напряжений первого рода, т.е. таких, которые уравниваются в объёме всей детали. Возникшие напряжения, а также закалочные микротрещины инициировали развитие усталостных трещин от краёв заплывленной шпоночной канавки.

Излом вала – проставка судна «Волго – Нефть 152» произошёл в его средней части по винтовой поверхности под средним углом около 45° к оси валопровода (рис. 8).

Местом возникновения усталостной трещины явился наплавленный сварочный шов. Кроме этого, на поверхности фрагментов вала-коротыша было обнаружено ещё несколько следов от сварки. Выполнение этих небольших фрагментов наплавки технической документацией не предусмотрено.

Результаты исследований методом магнитной памяти металла показали низкое качество нанесенных сварных швов. Из анализа образцов, вырезанных по прилегающему к наплавленным участкам сечению, не ясна необходимость выполнения наплавки. Однако, эти короткие 20 – 35 мм длиной участки наплавленных швов имеют многочисленные дефекты сварки: кратеры в начале и конце швов, подрезы, наплывы, поры, непровар (рис. 9). Шов, который непосредственно явился местом начала усталостного разрушения, имеет горячую трещину, видную на фотографии (см. рис.9а).

Таким образом, наплавленные участки являются следствием воздействия, так называемой по ГОСТ 30242 – 97, случайной дуги. И именно: многочисленные дефекты, недопустимые по Правилам Российского Речного Регистра [5], привнесённые случайной дугой, явились причиной возникновения и развития усталостных трещин.

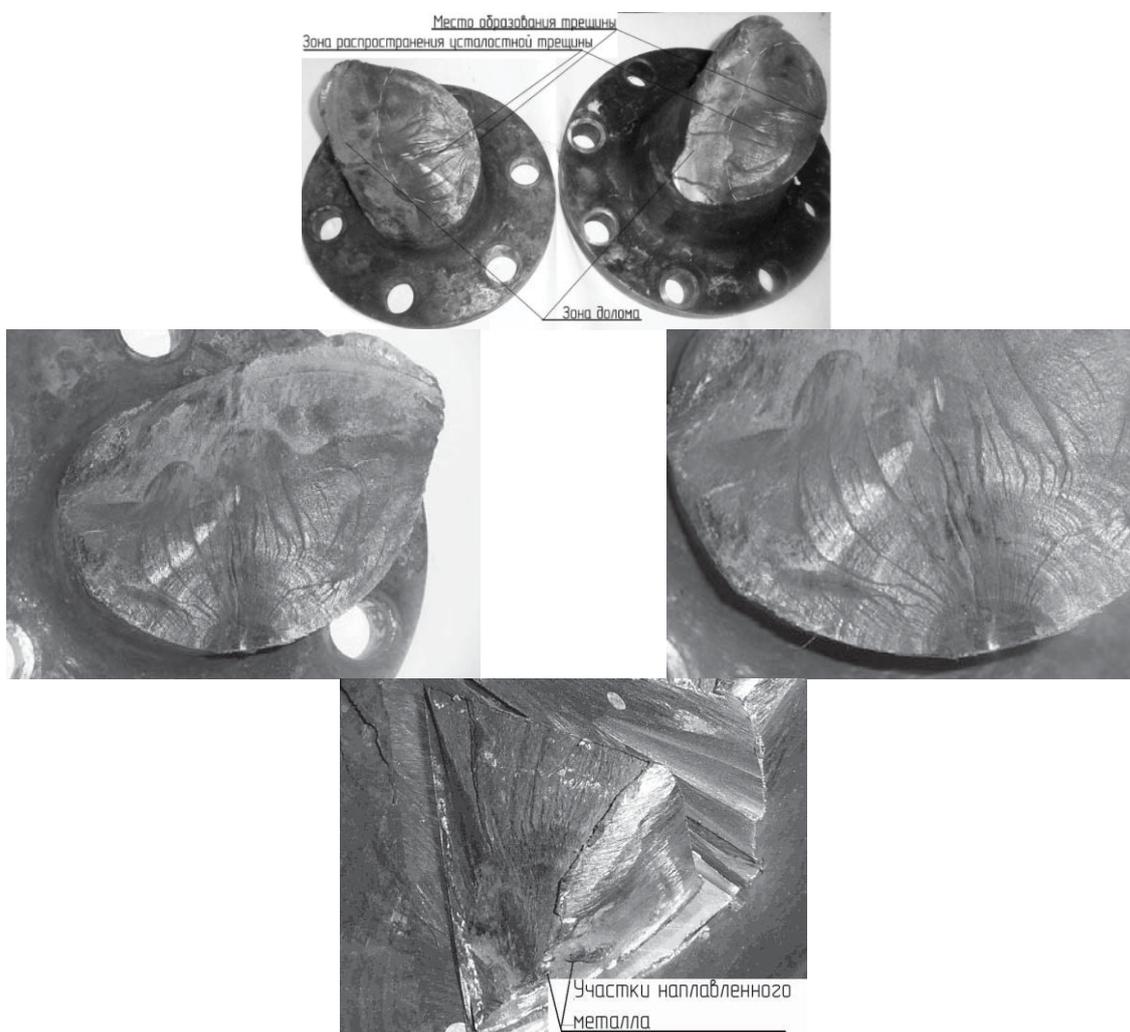


Рис. 8. Вид фрагментов вала – проставки теплохода «Волго – Нефть 152»

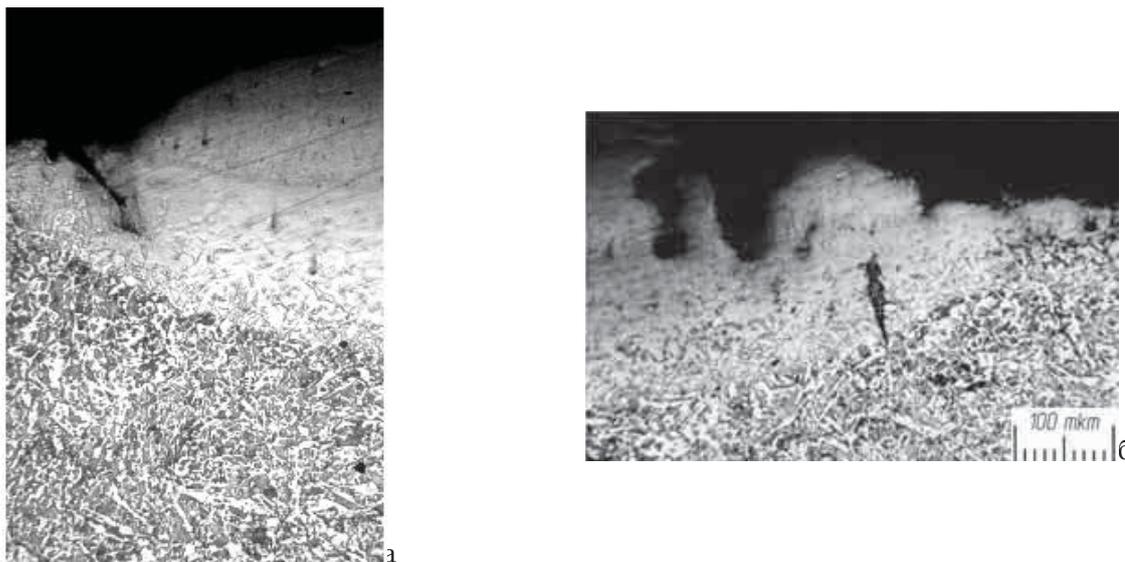


Рис. 9. Дефекты случайного сварного шва в поперечном сечении:
а – поры, холодные трещины; *б* – кратеры на поверхности сварного (наплавленного) металла

Выводы

– Причиной всех расследованных аварий явилось возникновение и развитие усталостных повреждений металла. Это, в свою очередь, есть следствие нарушения технологии сварки при изготовлении и наплавке при ремонте валов судового валопровода.

– Ряд дефектов в силу конструктивных особенностей сварных швов, а также по причине малых размеров и расположения не могут быть обнаружены капиллярным и ультразвуковым методом дефектоскопии специалистами предприятия изготовителя;

– Метод магнитной памяти металла (ММП – контроль) позволяет обнаруживать внутренние дефекты сварного шва, являющиеся концентраторами напряжений (непровары, поры, шлаковые включения, микротрещины) в силу малости их размеров, не обнаруживаемые другими широко известными и традиционными методами неразрушающего контроля;

– ММП – контроль может быть классифицирован, как метод ранней диагностики зарождающихся дефектов.

Список литературы

1. Мироненко И.Г., Мироненко А.Г. Обследование гребных валов методами неразрушающего контроля. Методические указания. – Новосибирск: НГАВТ, 2011. – 31 с.;
2. Дубов А.А., Дубов Ал.А., Колокольников С.М. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля: Учебное пособие, 5-е изд. М.: ИД «Спектр», 2012. 395 с.
3. Власов В.Т., Дубов А.А. Физическая теория процесса «деформация-разрушение». Ч.1. Физические критерии предельных состояний металла. М.: ЗАО «Тиссо», 2007. 517 с.
4. Мироненко И.Г., Мироненко А.Г., Токарев А.О. Исследование вертикальных валов винторулевых колонок теплоходов «Балт Флот». Отчёт по НИР, г/р № 115102260036, СГУВТ, 2016. 46 с.;
5. Российский Речной Регистр, Правила (в 5 томах). Т. 2., Москва, 2015. – 437 с.

**THE INFLUENCE OF WELDING – SURFACING WORKS ON
THE FATIGUE STRENGTH OF STEEL**

Tokarev A.O., Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor
Mironenko I.G., Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor
Fedotova E.S., Ph.D. student

Siberian State University of Water Transport, 33, Schetinkina st., Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

The analysis of the reasons of breakages of shafts, assembled by welding, restored, subjected to a random arc. It is established that the damage occurred as a result of initiation of cracks with various welding defects: faulty fusion of the weld with the base metal, craters at the beginning and end of seams, undercuts, nodules, pores. A contributing factor to the propagation of cracks that caused the lack of penetration, it was the presence of hardening structures in the heat affected zone of the weld. Cracks occurred on the surfaces of the cutting of the weld, propagated in the direction of greatest mechanical stress along the boundaries of dendrite grains of the weld. Proposed measures for the prevention of welding defects is the welding of structural steel are improving in a pre-heated condition and subsequent annealing.

The method of metal magnetic memory (MMP-control) allows to detect internal defects of the weld, which is the stress concentrators (lack of penetration, pores, slag inclusions, cracks) because of their small dimensions, not found in other widely known and traditional NDT methods (nondestructive testing);

MMP-control may be classified as a method of early diagnostics of emerging defects.

Keywords: Fatigue fracture, micro crack, welded seam, microstructure, heat-affected zone of welding, welding defects, method of metal magnetic memory.

УДК 621.76

МЕДНЫЙ ПОРОШОК, ПОЛУЧЕННЫЙ ИЗ ОТХОДОВ КАБЕЛЬНО – ПРОВОДНИКОВОЙ ПРОДУКЦИИ

*НИКИТИН Ю. Н., канд. техн. наук, доцент
(ЛНУ им. В. ДАЛЯ, г. Луганск, ЛНР)*

Никитин Ю.Н. – 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20 а,
Луганский национальный университет им. В. Даля,
е – mail: kaf_mater@mail.ru.

Аннотация

Разработана технология выделения меди в виде медного порошка электролизом из отходов после механической обработки лома кабелей с относительно тонкими токопроводящими медными жилами. Спроектирован и изготовлен механизированный электролизер с вращающимся дисковым катодом для получения порошка меди из отходов кабельно-проводниковой продукции. Выполнен сравнительный анализ химического состава, микроструктуры физико-механических и технологических свойств полученного порошка со стандартным.

Ключевые слова: медное порошок, электролиз, технологические параметры, отходы кабельно – проводниковой продукции, механической обработки отходов кабелей.

Введение

При переработке отходов кабельной промышленности наибольшую проблему составляют массовые отходы относительно тонких (менее 1 мм²) токопроводящих жил в изоляции. Остатки меди в полимерных отходах, составляют по весу от 5 – 8 до 10-15 % по массе полимерной фракции. После механической переработки отходов кабельно-проводниковой продукции полимеры, загрязненные медью не подвергаются вторичной переработке из-за быстрого износа оборудования. В России, странах СНГ и во всем мире, существенная часть ценных полимерных отходов кабелей и проводов подвергается сжиганию или захоронению, а это приводит к загрязнению окружающей среды. Очевидно, что полное удаление меди из полимерных отходов может дать существенный экономический и экологический эффект [1 – 3].

Электролитический метод, не требующий применения дорогостоящих оборудования расходных материалов или специальных условий [4], возможен для получения медного порошка из отходов механической переработки кабельно-проводниковой продукции представляющего собой смесь дисперсной меди и полимерной крошки. Актуальным для достижения этой цели является разработка технологии разделения отходов на полимер пригодный для вторичной переработки и медный порошок.

Целью работы

является определение технологических параметров электролитического получения медного порошка из отходов механической переработки кабельно – проводниковой продукции и получение медного порошка электролизом по физическим и технологическим свойствам соответствующего требованиям стандарта.

Описание экспериментальных исследований

В исследованиях использовали отходы телефонных кабелей ТПВ 10×2×0,4, ТПВ 50×2×0,4, ТПВ 100×2×0,4 согласно ГОСТ 1639-2009.

Порошок меди получали из отходов телефонных кабелей по следующей технологии:

Резка телефонных кабелей производилась на отрезки длиной не более 1000 мм.

Для дробления отходов кабельно-проводниковой продукции использовали технологию воздушно - вибрационной сепарации с помощью механической дробилки SYSTEM REDOMA с последующим разделением металлической и полимерной крошки.

Получены волокна длиной от 0,5 до 10 мм и смесь дисперсной меди и полимерной крошки и пыль.

Для отделения меди в виде порошка из смеси за основу использовали механизированный электролизер с дисковым вращающимся катодом (рис. 1) [5]. Для получения медного порошка из смеси дисперсной меди и полимерной крошки с фракцией < 45 мкм соблюдали следующие технологические условия [6]:

- продолжительность электролиза – 20 минут;
- концентрация меди в электролите – не более 20 г/л;
- плотность тока – не менее 760 А/м²;
- концентрация кислоты в электролите – 40 г/л.

Восстановительный отжиг порошка осуществляли в печи при температуре 550° С 1 ч.

Выполняли размол и просев порошка. Размол порошка осуществляли в шаровой мельнице, рассев – на латунных сетках.

Для защиты порошка от окисления, его промывали в специальных ингибиторах емкостью 100 – 160 литров при температуре 45° С.

Сушку порошка выполняли 5 – 7 час, при температуре 100 °С с 10 – 35 % влаги до 0,05 %.

В качестве электродов использовали:

- анод - контейнеры, стенки которых выполнены из нейлона, а дно представляет собой перфорированный диск с отверстиями один миллиметр к которому присоединено электрическое питание, изготовлен из графитового материала и заполнен смесью полимерной крошки и медной сечки марки М1 – отходы, которые образуются при механической переработке лома и отходов кабельно-проводниковой продукции;

- катоды меди марки М1.

Механизированный электролизер с дисковым вращающимся катодом, работает следующим образом. Дисковый вращающийся катод 1 с щетками для удаления порошка с катодов 2 крепится к валу катода 3 установленного в катодной коробке 4, который в свою очередь крепится к крышке 5 установлена на корпусе 6. Через отверстие для заливки электролита 7, который находится в катодной коробке 4 подается электролит. Протекая через окна в перегородках 8 электролит заполняет корпус 6. Уровень электролита возрастает в корпусе 6 покрывая частично дисковый вращающийся катод 1 отверстием для слива электролита 9. Далее через отверстия в крышке погружают в электролит анод 10. Дисковый вращающийся катод 1 начинает вращаться. Холодильники 11 – охлаждают электролит до температуры 48-55°С. Щетки для удаления порошка с катодов 2 снимают порошок, который падает на дно корпуса 6. Электролит циркулирует со скоростью 20-40 л/мин. При снижении плотности тока процесс останавливают - из дна корпуса 6 порошок удаляют и меняют аноды 10.

Отработанные аноды разгружают и удаляют полимер. Циркуляцию смеси полимерной крошки и медной сечки выполняли с помощью центробежно – погружного насоса.

Форму, размеры, гранулометрический состав частиц медного порошка определяли согласно стандартным методикам.

Кислотность электролита, измеряли прибором рН – 2005.

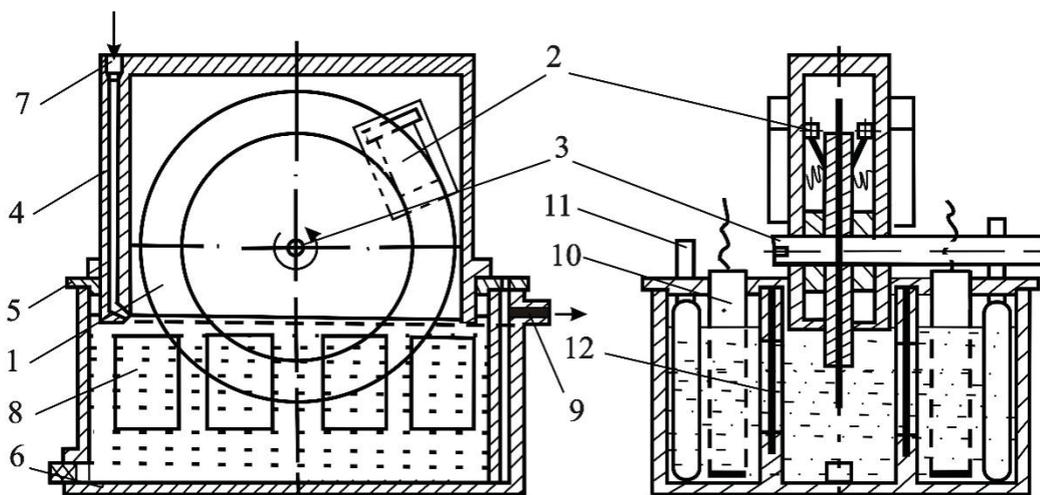


Рис. 1. Механизированный электролизер с вращающимся дисковым катодом для получения порошка меди из отходов кабельно – проводниковой продукции:

- 1 - дисковый вращающийся катод; 2 - щетки для удаления порошка с катодов;
3 - вал катода; 4 - катодная коробка; 5 – крышка; 6 – корпус; 7 - отверстие для заливки электролита; 8 - окна в перегородках; 9 - отверстие для слива электролита; 10 – анод;
11 – холодильник 12 - диафрагма

Результаты и обсуждение

На основании исследования характеристики и показателей отходов телефонных кабелей, установлено, что по виду металлолома они относятся к отходам кабельно-проводниковой продукции – Медь 13 (ГОСТ 1639 – 2009), а по химическому составу к марке меди М1 (ДСТУ ГОСТ 859 – 2003) (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав меди

| Марка меди | Cu, Ag,% не меньше | Примеси, %, не больше | | | | | | | | | | | |
|------------|-----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|----|-------|-------|-------|-------|----|
| | | Sb | As | Fe | Ni | Pb | Sn | O2 | Zn | Bi | P | S | Ag |
| М1 | 99,9 | 0,002 | 0,002 | 0,005 | 0,002 | 0,005 | 0,002 | -- | 0,005 | 0,001 | 0,003 | 0,005 | -- |

Определяли химический состав и физико-механические свойства медного порошка до отжига и после отжига при температуре 500°С. Химический состав представлен в табл. 2.

Как видно из табл. 2, после отжига содержание меди возрастает, что, очевидно, связано с уменьшением содержания кислорода за счет восстановления водородом оксидов меди.

Гранулометрический состав порошков приведен в табл. 3. Медный порошок, полученный из отходов, состоит из частиц, размеры которых несколько больше, чем размеры частиц порошка ПМС – В.

В связи с тем, что ситовой анализ применяется только для определения гранулометрического состава грубых и средних порошков и не дает качественного статистического анализа размеров частиц менее 40 мкм, для частиц размером от 1 – 100 мкм применяли оптический метод.

Таблица 2

Сравнительная характеристика химического состава медного порошка
до и после отжига

| Медный порошок из отходов | Массовая доля, % | | | | Прокаленный остаток после обработки порошка азотной кислотой, % не более |
|---------------------------|------------------|----------|------|-----|--|
| | Cu Не менее | Fe | O | Si | |
| | | Не более | | | |
| До отжига | 99,4 | 0,10 | 0,36 | - | 0,05 |
| После отжига | 99,5 – 99,9 | 0,10 | 0,10 | - | 0,05 |
| ПМС-В ГОСТ 4960-75 | 99,5 | 0,02 | 0,10 | 0,1 | 0,05 |

Таблица 3

Сравнительная характеристика
гранулометрического состава порошков

| Тип порошка | Содержание частиц, %, размером, мм | | | |
|--------------------------------|------------------------------------|--------|--------|---------|
| | <0,160 | <0,100 | <0,063 | <0,045 |
| Медный из отходов | 0-1 | 99 | - | 50 – 75 |
| Электролитический ГОСТ 4960-75 | 0-0,5 | 99,5 | - | 65 – 80 |

Графическое изображение результатов дисперсного анализа обоих видов порошков, выполненного оптическим и ситовым анализом, приведено на рис. 2 и рис. 3.

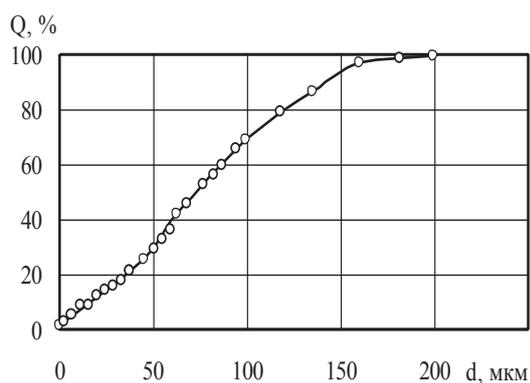


Рис. 2. Куммулятивное распределение частиц по размерам

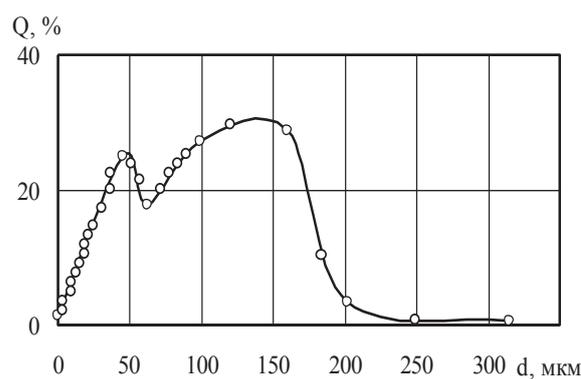


Рис. 3. Частная кривая распределения размеров частиц

Наиболее высокую насыпную плотность имеет медный порошок из отходов (табл. 4). Насыпная плотность оказывает большое влияние на технологические свойства порошка: постоянство массы при засыпке в пресс-форму и усадку при спекании. Чем меньше насыпная плотность, тем больше усадка при спекании и хуже дозировка при прессовании. Знание этой величины очень существенно при конструировании пресс-форм. Порошки с малой насыпной плотностью требуют пресс-формы с большей полостью.

Как известно, большая величина насыпной плотности медного порошка после восстановительного отжига связана со сглаживанием поверхности, а меньшая величина плотности утряски с изменением гранулометрического состава. Количество мелких фракций в результате размолла в молотковой мельнице увеличивается, а после восстановительного отжига уменьшается.

Разброс результатов измерения микротвердости объясняется наличием внутренних пор в частицах и краевыми эффектами в случае попадания на частицы относительно небольшой толщины. Микротвердость является своего рода характеристикой пластичности. Величина микротвердости медного порошка после восстановительного отжига уменьшается, что указывает на значительное повышение пластичности.

Частицы порошка ПМС – В и порошка из отходов имеют дендритную форму (рис. 4). Форма частиц оказывает влияние на насыпную массу и прессуемость порошка (плотность, прочность и однородность прессовки). Прессовки, изготовленные из частиц дендритной формы, имеют наибольшую прочность.

Микроструктура порошка дает возможность оценить влияние технологии его обработки и механические свойства (рис. 4).

Таблица 4

Сравнительная характеристика плотностей порошков

| Тип порошка | Насыпная плотность, г/см ³ | Плотность утряски, г/см ³ |
|---------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Медный до отжига | 3,2 | 4,34 |
| Медный после отжига | 3,36 | 3,84 |
| Стандартный порошок | 2,3 – 2,7 | 3,1 |

Пикнометрическую плотность порошка представлена в табл. 5.

Таблица 5

Сравнительная характеристика пикнометрической плотности порошков

| Тип порошков | Плотность, г/см ³ | |
|---------------------------|------------------------------|---------------|
| | экспериментальная | теоретическая |
| Медный порошок из отходов | 8,75 | 8,94 |
| Стандартный порошок | 8,74 – 8,77 | |

Отклонение плотности от теоретической объясняется присутствием недовосстановленных оксидов после восстановления, наличием микропор и полостей, образовавшихся в условиях термообработки. Результаты определения микротвердости представлены в табл. 6.

Частицы порошка из отходов промышленности после отжига имеют бал зерна 13 – 14 (рис. 4 а). Частицы порошка ПМС – В в средней части имеют мелкозернистую структуру, а в периферийной части имеют значительно большие кристаллы направленные к центру частицы и чем болье частица тем более мелкозернистых кристаллов (балл зерна 12 – 13) (рис. 4 б). Такая микроструктура порошка связана с особенностью его изготовления. Частицы порошка до отжига (рис. 4 в) имеют балл зерна 11 – 12, что связано с наклепом в результате получения порошка.

Таблица 6

Микротвердость порошков

| Тип порошка | Пределы значений микротвердости, МПа |
|---------------------|--------------------------------------|
| Медный до отжига | 750 – 940 |
| Медный после отжига | 200 – 412 |
| Стандартный порошок | 840 |

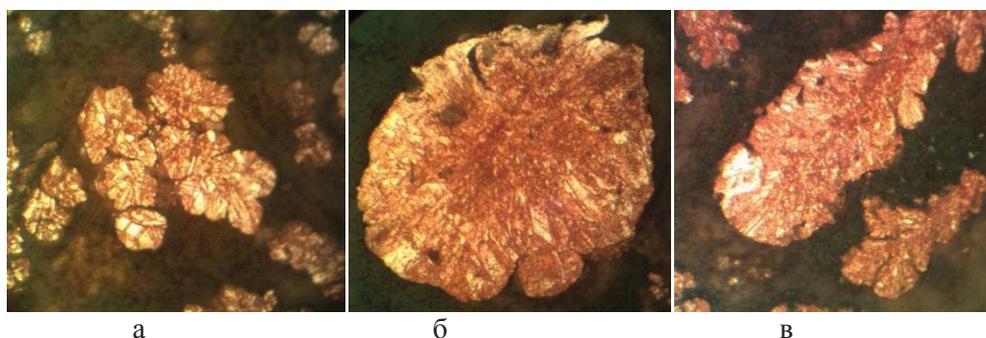


Рис. 4. Микроструктуры порошков $\times 500$:
а) – ПМС-В; б) – после отжига; в) – до отжига

Уплотняемость порошка определяется его свойствами: размером частиц, их формой, степенью наклепа и газонасыщением. Сравнение уплотняемости порошков представлено на рис. 5.

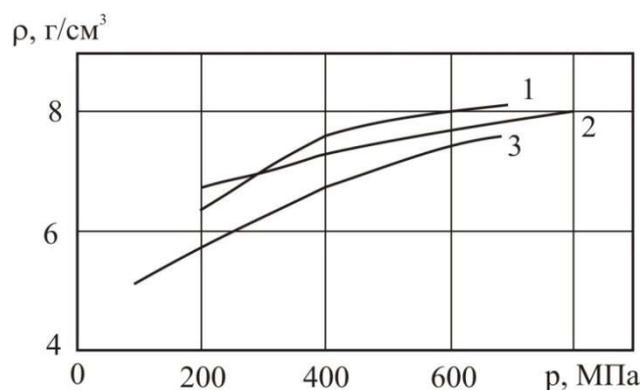


Рис. 5. Уплотняемость: 1 – медный порошок после отжига; 2 – медный порошок до отжига; 3 – ПМС – В ГОСТ 4960 – 75

Наклепанный, неотожженный, окисленный и газонасыщенный медный порошок имеет более низкую уплотняемость в сравнение с отожженным порошком, при тех же давлениях прессования из него получаются прессовки меньшей плотности. Это можно объяснить сравнительно низкой пластичностью частиц вследствие наклепа и образования оксидной пленки на поверхности. Подтверждением этого факта являются данные по микротвердости порошка, которая характеризует его пластичность (табл. 6). Вместе с тем невосстановленный медный порошок имеет лучшую уплотняемость в сравнении с ПМС – В, что связано с влиянием свойств порошка. Известно, что мелкодисперсные порошки с развитой формой частиц обладают невысокой уплотняемостью, тогда как порошки, имеющие большую насыпную плотность, уплотняются лучше. Кроме того, развитая поверхность частиц порошка способствует интенсивной адсорбции газа на поверхности, что снижает уплотняемость. Подтверждением выше сказанного являются экспериментальные данные по определению формы частиц (рис. 3) и насыпной плотности порошков (табл. 6).

Выводы

Разработанная технология, с применением механизированного электролизера с вращающимся дисковым катодом, выделения меди в виде медного порошка электролизом из отходов после механической обработки лома кабелей с относительно тонкими токопроводящими медными жилами позволяющая получить порошок по свойствам соответствующими стандартным порошкам.

Список литературы

1. Герасин В.А. Как спасти полимер - металлические отходы // The Chemical Journal. Июль-август 2008, С. 10 – 13.
2. Петруков О.П., Шубов Л.Я., Гаев Ф.Ф. Концепция оптимизации комплексного управления ТБО в Московской области // ТБО (Твердые бытовые отходы). 2007. № 9.
3. Рябичева Л.А. Никитин Ю.Н., Марков В.Л., Цыркин А.Т. Свойства медного порошка полученного из лома проводников тока // Металлообработка, 2004, №3 (21) – С. 40 – 42.
4. Агеев Е.В. Состав и свойства медных порошков, полученных электроэрозионным диспергированием: монография. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2014. – 143 с.
5. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия: учебник для вузов. 2-е изд, М.: Металлургия, 1991. С. 45 – 47.
6. Никитин Ю.Н. Влияния технологических параметров электролиза на процесс осаждения медного порошка // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением: Сб. науч. тр. – Луганск: изд-во ЛГУ им. В. Даля, №2 (17), 2016, С. 13 – 21.

**INFLUENCE OF MODES OF HEAT TREATMENT ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF
OUTWARD SPRINGS OF ROLLING STOCK**

Nikitin Yu.N. C.Sc.(Engineering). Associate professor, e – mail: kaf_mater@mail.ru

Lugansk national University of Vladimir Dahl, quarter young People, 20a, Lugansk republic of people's

Abstract

The technology of release of copper in the form of copper powder by electrolysis from waste after machining of scrap of cables with rather thin conducting copper veins is developed. The mechanized electrolyzer with the rotating disk cathode for receipt of powder of copper is designed and manufactured of waste of cable and conduction products. The comparative analysis of the chemical composition, a micro-structure of physicomachanical and technological properties of the received powder with standard is made.

Keywords: copper powder, electrolysis, technological parameters, waste of cable and conduction products, machining of waste of cables.

УДК 669.018.2

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НАРУЖНЫХ ПРУЖИН ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

*ДУБАСОВ В. М., канд. техн. наук, доцент,
МОГИЛЬНАЯ Е. П., канд. техн. наук, доцент
(ЛНУ им. В. ДАЛЯ, г. Луганск, ЛНР)*

Дубасов В. М. – 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20 а,
Луганский национальный университет им. В. Даля,
е – mail: kaf_mater@mail.ru

Аннотация

Проведен анализ публикаций, в которых рассматривается решение данной проблемы. Изучены режимы термической обработки во время горячей навивки пружин с последующей закалкой. Приведены результаты опытных работ по определению оптимальных температур нагрева металла и термической обработки. Приведены результаты по определению температурного интервала отпуска пружин.

Приведены результаты замера твердости после отпуска при различном температурном интервале отпуска. Показаны микроструктуры основного металла опорного и рабочего витков пружины.

Ключевые слова: сталь 60С2ХФА, легирование, наружные трещины, закалка, отпуск, твердость, микроструктуры, контроль.

Введение

Пружины рессорного подвешивания магистральных тепловозов испытывают в работе многократные знакопеременные нагрузки и после снятия нагрузки должны полностью восстанавливать свои первоначальные размеры.

В связи с такими условиями работы металл, применяемый для изготовления пружин и рессор, должен обладать, кроме необходимой прочности в условиях статического, динамического или циклического нагружений, достаточно хорошей пластичности, высокими пределами упругости и выносливости и высокой релаксационной стойкостью, а при работе в агрессивных средах (атмосфере пара, морской воде и др.) должен быть также и коррозионностойким.

Как показывает работа [1] пружины большого сечения (диаметром > 40 мм) целесообразно изготавливать из стали 60С2ХФА совместно легированная кремнием хромом и ванадием. Эта сталь характеризуется мелко зернистым строением и малой склонностью к росту зерна. Так по данным М. Ю. Эйфера, при повышении температуры нагрев от 840 до 1050° С зерно увеличивается с 8 балла до 7 – 6, а в интервале оптимальных температур закалки его величина сохраняется на уровне балла 8.

Авторы работы [2] считают, что одним из наиболее эффективных методов упрочнения сталей в настоящее время является термомеханическая обработка. Она обеспечивает не только высокие значения прочности при удовлетворительной пластичности, но также и повышенную усталостную прочность и высокий предел упругости и позволит значительно улучшить основные свойства пружинных сталей и качество упругих элементов

В работе [3], указано, что дополнительное легирование этих сталей, в первую очередь карбидообразующими элементами Cr, Mo, W, V, стабилизирующими субструктуру, должно привести к повышению сопротивления сталей малым пластическим деформациям и особенно релаксационной

стойкости. Легирование карбидообразующими элементами должно способствовать успешному проведению термомеханической обработки благодаря замедленному протеканию рекристаллизационных процессов. Легирование сильно карбидообразующими элементами, в частности, ванадием в количестве большем 0,3% при достаточном содержании углерода приводит, кроме того, к явлению вторичной твердости [3], т. е. к дополнительному упрочнению мартенситной матрицы за счет выделения мелкодисперсных карбидов ванадия.

Целью работы является изучение влияния режимов термической обработки на структуру и свойства пружин рессорного подвешивания магистральных тепловозов.

Описание экспериментальных исследований

Изготовление пружин производится путем горячей навивки с последующей термической обработки. Операции навивки и закалки пружин производятся с одного нагрева. Температурный режим изготовления пружин производился по инструкции ОГМет. Нагрев под навивку – 950°С. Температура закалки – не ниже 870°С, температура отпуска – 520 – 610° С.

Для обеспечения качества пружин на ОАО "Холдинговая компания "Лугансктепловоз" был выполнен ряд работ по выявлению брака наружных пружин рессорного подвешивания магистральных тепловозов типа ТЭ 116.

В процессе работы производились контрольные замеры твердости пружин в цехе и отбирались для исследования пружины, изготовленные по разным вариантам.

Контроль качества структуры производился на микрошлифах, подвергаемых травлению в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте.

Определение микроструктуры основного металла производился с помощью металлографического микроскопа при увеличении x500, а поверхностной зоны и величины действительного аустенитного зерна при увеличении x100, x500. Контроль аустенитного зерна производится при необходимости.

Оценка микроструктуры опытных пружин производился путем сопоставления микроструктур с эталонами шкал №№ 1-2.

Согласно инструкции по контролю качества микроструктура поверхностной зоны витков пружин может состоять из обезуглероженного слоя, переходящего в структуру основного металла [4].

При сквозной прокаливаемости витков пружин, изготавливаемых из стали марки 60С2ХФА и из прутков диаметром 36 мм микроструктура основного металла, наблюдаемая сразу за обезуглероженным слоем, должна соответствовать эталонам 1-3 и распространяться на глубину в соответствии с кривыми прокаливаемости (не менее 1/3 диаметра витка пружин). В остальной части сечения витка до центра, в основном металле допускается пластинчатые структуры (эталон 4-6). Эталон 4 не допускается для пружин пассажирских тепловозов.

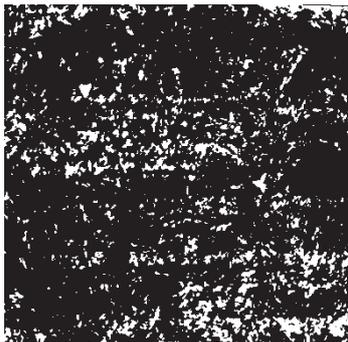
Микроструктура основного металла должна состоять из троостомартенсита (эталон 1) или троостита (эталон 2), или троостосорбита (эталон 3) мелко или среднеигольчатого строения [5].

Результаты и обсуждение

Пружина № 1. Температура нагрева под закалку 950° С. Конец штанги подстужен до 900° С. Температура закалки пружины неравномерная: 3 витка – 830° С, остальные – 860° С. Металлографическим анализом установлено, что на витках (3, 4 и 6), закаленных с температуры 830° С распределение твердости по сечению неравномерное, по сечению витков (1, 2, 5), закаленных с температуры

860° С – равномерное. Глубина частично обезуглероженного слоя – 0,27 мм. Микроструктура основного металла пружины № 1 всех витков троостомартенсит (рис. 1).

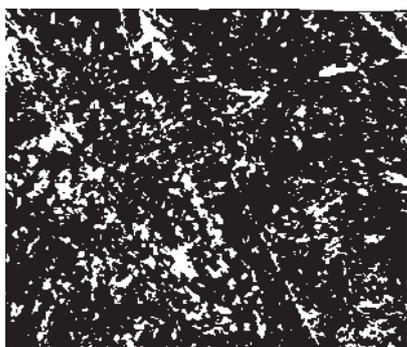
Пружина № 2. Температура нагрева под навивку составлял 980° С. Металл прогрет равномерно. Температура закалки – 870° С. Распределение твердости по сечению витков равномерное. Микроструктура поверхностной зоны витка соответствует эталону 2, рабочего витка – эталону 3. По действующей шкале эталонов микроструктур для контроля качества пружин, изготовленных по ГОСТ 1452-2011 [3], эталоны 1,2 7 – 9 являются удовлетворительными, относятся к одной группе – зоне частичного обезуглероживания без наклепа, сходны между собой. Глубина частичного обезуглероженного слоя опорного витка составляет 0, 18 мм, рабочего витка – 0,15 мм. Микроструктура основного металла опорного и рабочего витков одинакова – троостомартенсит (рис. 2).



× 500

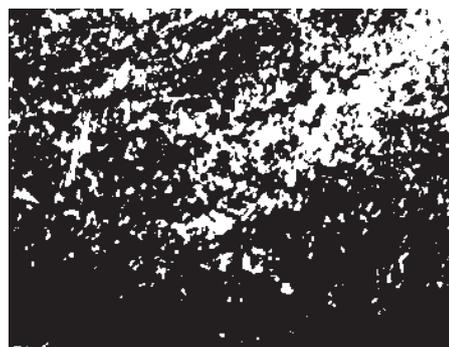
Рис. 1. Микроструктура основного металла пружины №1
всех витков – троостомартенсит

Пружина № 3. Прогрев равномерный, навивка проводилась с 980° С. Температура закалки 870° С. Три витка отобраны после закалки, остальные после отпуска при 510° С. Распределение твердости по сечению образцов равномерное. Микроструктура сердцевинки опорного витка – мартенситная, витков 2 и 3 троостомартенситная. Это можно объяснить меньшим сечением опорного витка, следовательно большей скоростью охлаждения. Микроструктура сердцевинки 4 и 3 – троостит (рис. 3).



×500

Рис. 2. Микроструктура основного металла
опорного и рабочего витков



×500

Рис. 3. Микроструктура сердцевинки 4 и
3 – троостит

Для определения температурного интервала отпуска, в условиях ЦЗЛ проводился отпуск при разных температурах: 500° С, 520° С, 540° С, 650° С, 580° С, 600° С.

Результаты замера твердости после отпуска приведены в таблице.

Влияние температуры отпуска на твердость пружин

| Температура отпуска, °С | Диаметр отпечатка | Твердость, НВ |
|-------------------------|-------------------|---------------|
| 1 | 2 | 4 |
| 500 | 2,95-3,0 | 429-418 |
| 520 | 2,95-3,0 | 429-418 |
| 540 | 2,95-3,0 | 429-418 |
| 560 | 3,15 | 375 |
| 580 | 3,2 | 363 |
| 600 | 3,2 | 363 |

Выводы

Экспериментально установлено, что причинами брака пружин по твердости являются: нарушение технологической инструкции, неравномерный нагрев под навивку, заниженная температура закалки, отсутствие контроля температурного режима, несоблюдение режима отпуска.

Список литературы

1. Рахштад А. Г. Пружинные стали и сплавы. / под. ред. А. Г. Рахштада. Изд-во Металлургия, 1971. – 496 с.
2. Ильин С. И., Корягин Ю. Д. Технология термической обработки сталей/ Учебное пособие. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 120 с.
3. Околович Г. А., Околович А. Г., Гурьев А. М. Свойства пружинных сталей после термообработки и деформационного упрочнения // XV Международная научно-техническая конференция студентов и молодых ученых. - Томск. 2009. С. 112 – 114.
4. МИ 08М58-03. Методические инструкции по контролю качества термической обработки пружин подвижного состава. Луганск, 2012. – 17 с.
5. ГОСТ 1452-2011. Пружины цилиндрические винтовые тележек и ударно – тяговых приборов подвижного состава железных дорог. Технические условия. М. : Стандартиформ, 2011. – 26 с.

INFLUENCE OF MODES OF HEAT TREATMENT ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF OUTWARD SPRINGS OF ROLLING STOCK

Dubasov V. M. C.Sc.(Engineering). Associate professor, e – mail: kaf_mater@mail.ru

Mogilnaja H.P. C.Sc.(Engineering). Associate professor, e – mail: kaf_mater@mail.ru

Lugansk national University of Vladimir Dahl, quarter young People, 20a, Lugansk republic of people's

Abstract

The analysis of publications the decision of this problem is examined in that is conducted. The modes of heat treatment are studied during hot winding of springs with the subsequent tempering. Results over of the experienced works are brought on determination of optimal temperatures of heating of metal and heat treatment. Results over are brought on determination of temperature interval of vacation of springs. Results over of measuring of hardness are brought after vacation at the different temperature interval of vacation. The microstructures of parent metal are shown founding and working coils of spring.

Keywords: steel 60C2XΦA, alloying, outward cracks, tempering, vacation, hardness, microstructures, control.

УДК 621.787.4

ОЦЕНКА ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ УПРОЧНЕНИИ ОСЦИЛЛИРУЮЩИМ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ

*ЗАЙДЕС С. А., доктор техн. наук., профессор,
НГУЕН ВАН ХИНЬ, аспирант
(ИРНИТУ, г. Иркутск, Россия)*

Зайдес С.А. – 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
e – mail: zsa@istu.edu; nguyenvanhinhck@gmail.com

Аннотация

Целью работы является исследования влияния основных параметров осциллирующего выглаживания на шероховатость упрочненных поверхностей. Экспериментальными исследованиями установлено, что шероховатость после осциллирующего выглаживания зависит от параметров обработки: подачи, натяга, частоты вращения заготовки и угла поворота инструмента. Шероховатость поверхности после осциллирующего выглаживания уменьшается при понижении подачи инструмента. Увеличение угла наклона рабочего инструмента (по часовой стрелке) приводит к снижению шероховатости поверхности, если подача инструмента направлена справа налево. Скорость деформирования при осциллирующем выглаживании ограничивается 8 – 9 м/мин. Существует рациональная глубина внедрения инструмента (в нашем случае $t = 0,1 - 0,2$ мм), при которой обеспечивается наилучшая шероховатость поверхности.

Ключевые слова: осциллирующее выглаживание, угол наклона инструмента, натяг, подача, частота вращения.

Введение

Состояние вопроса. Для повышения качества поверхностного слоя деталей машин существует ряд методов, одним из них является метод поверхностного пластического деформирования (ППД), при котором происходит тонкое пластическое деформирование поверхностного слоя. Эффективным направлением совершенствования методов ППД является применение дополнительных колебательных и осциллирующих движений [1, 2], которые позволяют кроме отделочно-упрочняющей обработки формировать регулярный микрорельеф на упрочняющей поверхности. При совершенствовании методов отделочной обработки поверхностей и создания регулярного микрорельефа профессором Шнейдером Ю.Г. предложена схема вибрационного обкатывания [3], а профессором Поповым М.Е. разработана технология и инструментальное оснащение осциллирующего ППД [2]. Предложенные методы упрочняющей обработки отличаются кинематикой деформирующего инструмента, который совершает возвратно – поступательное движение вдоль или поперек оси детали. При этом каждая микрizona поверхностного слоя испытывает давление в разных направлениях. Перемена знака напряжений отражена эффектом Баушингера [10] и проявляется в изменении механических свойств упрочняемого материала.

Шероховатость является характеристикой качества поверхности, оказывающей большое влияние на многие эксплуатационные свойства деталей машин: износостойкость, коррозионную стойкость, усталостную прочность, стабильность посадок, герметичность соединений [7]. Установлено, что прочность стальных деталей, обработанных резанием, по сравнению с полированными дета

лями в условиях знакопеременной нагрузки составляет 40 – 50 % [6]. Грубо обработанные поверхности более подвержены коррозии, особенно в атмосферных условиях, так как коррозия наиболее интенсивно протекает на дне микронеровностей и мелких надрезов [3].

От шероховатости поверхности зависит и стабильность неподвижных посадок. При запрессовке детали наблюдается сглаживание микронеровностей, приводящее к уменьшению фактического натяга. В связи с этим уменьшение прочности соединения деталей обнаруживается при более шероховатых поверхностях [5, 6].

Предлагаемая технология отделочно-упрочняющей обработки осциллирующим выглаживанием является новым процессом поверхностного пластического деформирования, поэтому в настоящее время отсутствует информация о влиянии параметров деформирования на качество поверхностного слоя.

Целью работы является исследование влияния основных параметров осциллирующего выглаживания на шероховатость упрочненных поверхностей.

Методика выполнения экспериментов

Схема осциллирующего выглаживания цилиндрических деталей представлена на рис. 1. В качестве рабочего инструмента использована пластина, имеющая скругление на одном из торцов по радиусу (r). Эта часть пластины является рабочим элементом, который прижимается к вращающейся обрабатываемой заготовке. Пластина может поворачиваться относительно вертикальной плоскости на некоторый угол α (см. рис. 1), а также совершать осциллирующие вертикальные движение относительно оси заготовка и перемещаться в осевом направлении по направлению подачи S . Поворот пластины по часовой стрелке принято обозначать со знаком плюс (+) (см. рис. 1), а против часовой стрелки – знаком (-).

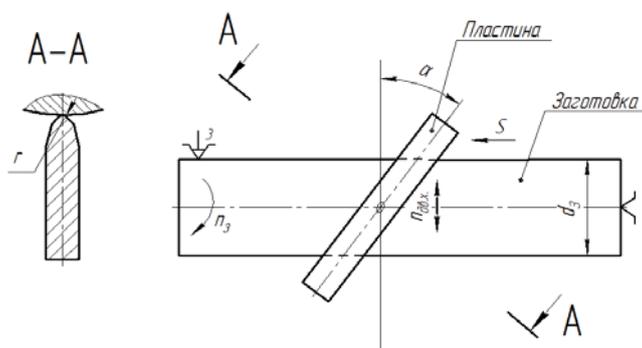


Рис. 1. Схема процесса осциллирующего выглаживания цилиндрических деталей

Для определения влияния параметров осциллирующего выглаживания на шероховатость упрочненных деталей были проведены эксперименты, основными параметрами которых влияющими на шероховатость поверхностного слоя, являются подача, натяг, частота вращения заготовки и угол наклона рабочего инструмента.

Эксперименты выполнены с помощью устройства для создания осциллирующего движения рабочему инструменту (рис. 2). Вращение от мотор – редуктора 1 передается через эксцентрик на подвижную пластину в корпусе 2, которая совершает возвратно – поступательное движение в вертикальной плоскости. К этой пластине крепится деформирующий элемент имеющей возможность по-

ворачиваться относительно вертикальной оси на угол $\pm\alpha$ (см. рис. 1). Обрабатываемая заготовка 4 одним концом крепится в 3^x кулачковом патроне 3, а другим – поджимается задним центром 6. Устройство для осциллирующего упрочнения крепится на суппорте токарного станка вместо резцедержателя.

Для определения влияния параметров осциллирующего выглаживания на шероховатость упрочненных деталей изготовили цилиндрические образцы из стали 45 диаметром 23 мм (рис. 3). Образец разделен канавками на 6 участков, каждый из которых упрочнен с разными режимами обработки. Характеристики образца: форма поверхности – цилиндрическая; материал – сталь 45 – упругопластический, упрочняющийся. Характеристики индентора: тип - пластина с рабочей поверхностью скругления $r = 4$ мм; материал — твердый сплав ВК8.

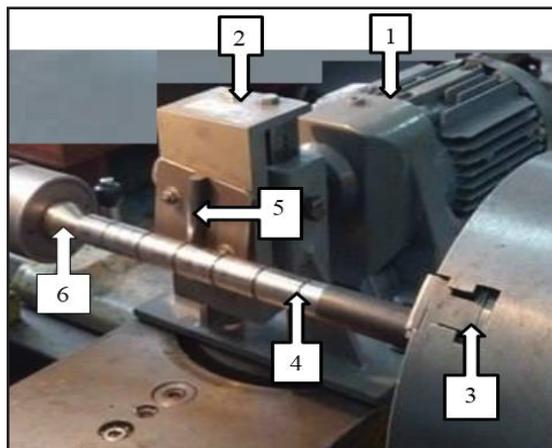


Рис. 2. Устройство для осциллирующего выглаживания цилиндрических деталей
1 – мотор-редуктор, 2 – корпус для закрепления деформирующего инструмента,
3 – 3^x кулачковый патрон, 4 – обрабатываемая заготовка, 5 – деформирующий инструмент,
6 – задний центр

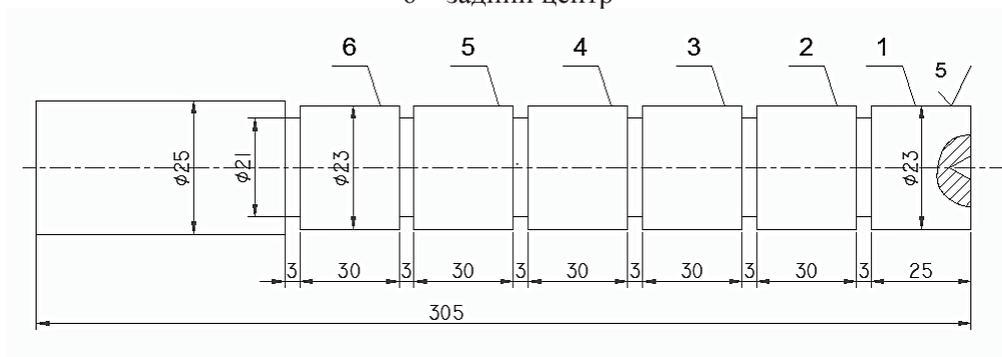


Рис. 3. Опытный образец для оценки шероховатости поверхности после осциллирующего выглаживания

Образец разделен канавками на 6 участков, каждый из которых упрочнен с разными режимами обработки. Характеристики образца: форма поверхности – цилиндрическая; материал – сталь 45 – упругопластический, упрочняющийся. Характеристики индентора: тип - пластина с рабочей поверхностью скругления $r = 4$ мм; материал — твердый сплав ВК8

Шероховатость обработанных поверхностей определена на приборе FormTalySurfi200. На каждом участке цилиндрического образца проведены измерения шероховатости в трех местах через 120° по окружности и вычислены средние арифметические значения Ra и Rz

Результаты экспериментальных исследований

Влияние подачи инструмента. Приняты следующие режимы обработки: частота вращения заготовки $n = 100$ об/мин., натяг $t = 0,1$ мм., угол наклона инструмента $\alpha = 0^\circ$, $\pi = 40$ дв.ход/мин., Γ дв.ход = 30 мм., подача инструмента изменялась от 0,07 до 0,3 мм/об. На рис. 4. показана зависимость параметров шероховатости Ra и Rz от величины подачи инструмента.

Результаты опытов показывают, что локальное пластическое деформирование существенно снижает шероховатость поверхности после механической обработки. Так, параметр Ra снижается в 3 – 6 раза, а Rz в 2 – 4 раза. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными известных работ [2, 3, 4]. Чем меньше подача инструмента, тем ниже шероховатость.

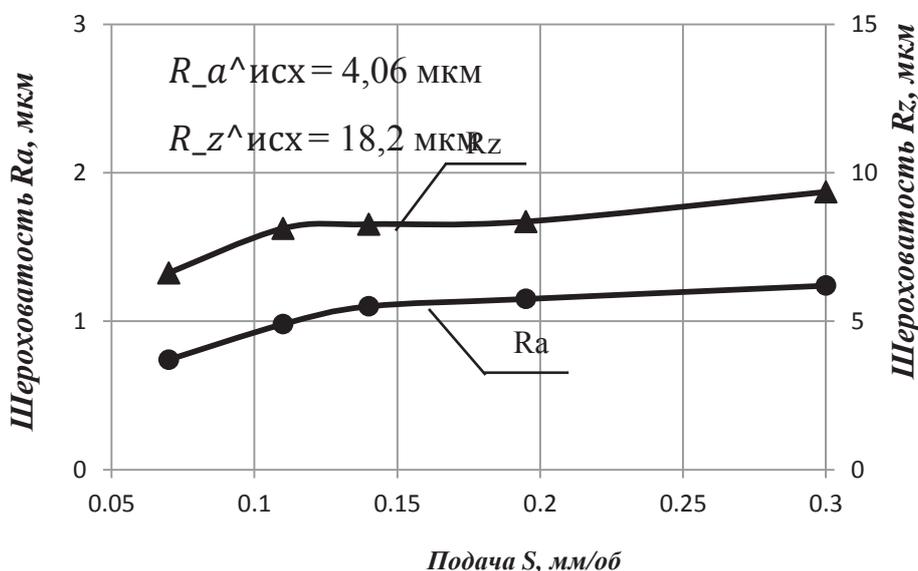


Рис. 4. Зависимость параметров шероховатости Ra и Rz от
Величины подачи рабочего инструмента

Влияние угла наклона рабочего инструмента. Приняты следующие режимы обработки: частота вращения заготовки $n = 100$ об./мин., натяг $t = 0,1$ мм., $\pi = 40$ дв.ход/мин., Γ дв.ход = 30 мм., величина подачи инструмента $S = 0,14$ мм/об., Угол наклона инструмента от $+10^\circ$ до -10° .

На рис. 5. показана зависимость шероховатости упрочненной поверхности от угла наклона рабочего инструмента.

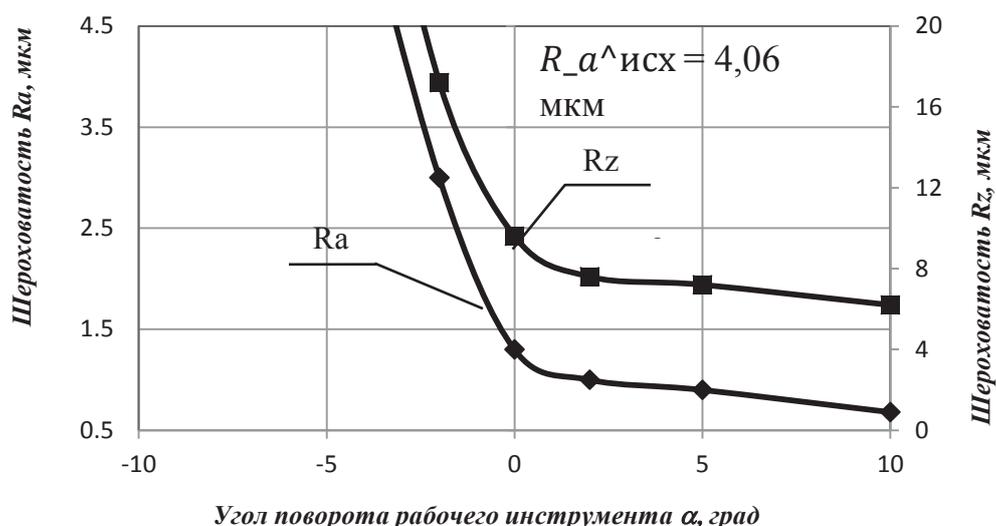


Рис. 5. Зависимость параметров шероховатости R_a и R_z от угла поворота рабочего инструмента

Результаты экспериментального определения зависимости шероховатости от положения инструмента показывают, что увеличение угла наклона инструмента по часовой стрелке приводит к улучшению шероховатости, если подача инструмента направлена справа налево, и на оборот, если подача инструмента направлена слева направо, то шероховатость будет резко возрастать из-за разрушения поверхности вследствие перенаклепа. Увеличение угла наклона инструмента в направлении против часовой стрелки быстрее приводит к перенаклепу поверхности, если подача инструмента направлена справа налево, и на оборот, если подача инструмента направлена слева направо, то шероховатость будет снижаться. Полученные результаты качественно согласуются с экспериментальными данными работы [1].

Влияние частота вращения заготовки. Приняты следующие режимы обработки: подача инструмента $S = 0,14$ мм/об., натяг $t = 0,1$ мм., угол наклона инструмента $\alpha = 0^0$, $n = 40$ дв.ход/мин., $l_{дв.ход} = 30$ мм., частота вращения заготовки от 50 до 250 об/мин. На рис. 6. показана зависимость шероховатости поверхностного слоя от частоты вращения заготовки.

Достаточно низкая шероховатость получена при невысокой частоте вращения заготовки. При большой скорости деформирования происходит повреждение и разрушения поверхности заготовки. (На рис 6. экстремальное увеличение шероховатости не показано).

Влияние величины натяга. Приняты следующие режимы обработки: частота вращения заготовки $n = 100$ об./мин., угол наклона рабочего инструмента $\alpha = 0^0$, величина подачи инструмента $s = 0,14$ мм/об., величину натяга изменяли от 0,05 до 0,5 мм. На рис. 7. показана зависимость шероховатости поверхности от величины натяга.

Установлено, что существует рациональная глубина внедрения инструмента, при которой формируется наименьшая шероховатость поверхности при осциллирующем выглаживании.

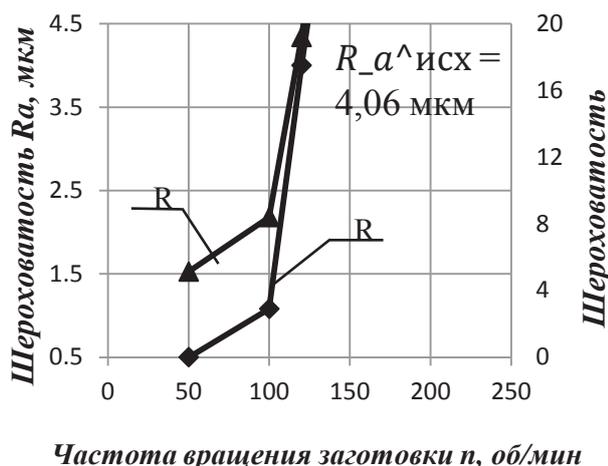


Рис. 6. Зависимость параметров шероховатости R_a и R_z от частоты вращения заготовки

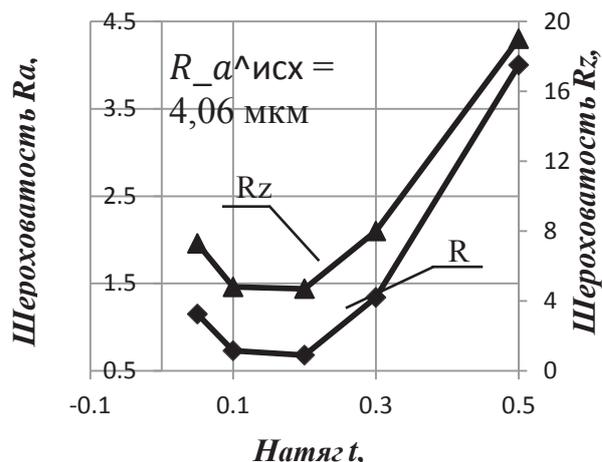


Рис. 7. Зависимость параметров шероховатости R_a и R_z от величины натяга

При малой величине обжатия происходит неполное выглаживание неровностей, так как небольшое удельное давление не позволяет полностью деформировать микронеровности поверхности. При большой глубине внедрения инструмента происходит не только рост шероховатости, но и повреждение поверхности образца. При оптимальной величине натяга ($t = 0,15$ мм) параметр шероховатости R_a снижается в 6 раз, а R_z в 4 раза.

Выводы

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить влияния основных параметров осциллирующего выглаживания на шероховатость цилиндрических деталей:

1. Шероховатость поверхности после осциллирующего выглаживания уменьшается при понижении подачи инструмента, но при этом происходит снижения производительности процесса.
2. Увеличение угла наклона рабочего инструмента (по часовой стрелке) приводит к снижению шероховатости поверхности, если подача инструмента направлена справа налево, и на оборот, если подача инструмента направлена слева направо то будет происходить перенаклеп и повреждение поверхности детали.
3. Скорость деформирования при осциллирующем выглаживании ограничивается 8-9 м/мин ($n = 120$ об/мин). Повышенные скорости (больше 8 – 9 м/мин) приводит к увеличению шероховатости или перенаклепу.
4. Существует рациональная глубина внедрения инструмента (в нашем случае $t = 0,1 - 0,2$ мм), при которой обеспечивается наилучшая шероховатость поверхности. Повышение глубины внедрения инструмента приводит к перенаклепу при осциллирующем выглаживании.

Список литературы

1. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь. Оценка качества поверхностного слоя при реверсивном поверхностном пластическом деформировании// Вестник ИрГТУ. 2016. №6. С. 34 – 40.
2. Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием. Монография под. ред. С. А. Зайдеса - Издательство ИрГТУ - Иркутск, 2014. – 559 с.

3. Шнейдер, Ю.Г. технология финишной обработки давлением: Справочник. СПб: Политехника, 1988. – 414 с.
4. Зайдес, С.А.; Емельянов, В.Н.; Полов, М.Е.; Кропоткина, Е.Ю.; Бубнов, А.С. Деформирующая обработка валов – Издательство Иргту - Иркутск, 2013. – 449 с.
5. Решетов Д.Н. Работоспособность и надежность деталей машин. М., “Высшая школа”, 1974. 206 с.
6. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М., Машиностроение, 1979. – 176 с.
7. Реслер И., Хардерс Х., Бекер М. Механическое поведение конструкционных материалов – Издательство. Интеллект, Долгопрудный. 2011. – 502 с.
8. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М. Машиностроение. 2002. – 299 с.
9. Жасимов М. М. Управление качеством деталей при поверхностном пластическом деформировании. Издательство Наука, Алма-Ата, 1986. – 205 с.
10. Фридман. Я. Б. Механические свойства материалов часть 1; Издательство. Машиностроение. 1974. – 472 с.

THE EVALUATION OF SURFACE ROUGHNESS OF MACHINED PARTS UNDER STRENGTHENING BY OSCILLATING SMOOTHING

Zaydes S.A., D. Sc. (Engineering), Professor, e – mail: zsa@istu.edu
Nguyen Van Hinh, postgraduate student, e – mail: nguyenvanhinhck@gmail.com

Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

Abstract

The purpose of this work is to study the influence of the basic parameters of oscillating smoothing on the roughness of hardened surfaces. Experimental studies have established that the roughness after oscillating smoothing depends on the processing parameters: feed, interference, rotational speed of the workpiece and the tool of the rotational angle. The surface roughness after oscillating smoothing decreases when the tool feed is lowered. Increasing the tool angle (clockwise) reduces the surface roughness if the tool feed is directed from right to left. The speed of deformation with oscillating smoothing is limited to 8 – 9 m/min. There is a rational depth of implementation of the tool (in our case $t = 0.1 - 0.2$ mm) which the best roughness of the surface is provided.

Keywords: oscillating smoothing, tool angle, interference, feed, rotational speed.

УДК 621.9.047

ВЫБОР ЭЛЕКТРОЛИТА ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ P12Ф3К10М3

ЯНПОЛЬСКИЙ В. В. канд. техн. наук, доцент,
ИВАНОВА М. В., аспирант,
КАДЫРБАЕВ Р. М., аспирант,
ЖУРАВЛЕВА А. В., магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)

Иванова М.В. – 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e – mail: ivanova777888@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрена методика выбора электролита для электрохимической обработки быстрорежущей стали P12Ф3К10М3. Проведены поляризационные исследования анодного растворения стали P12Ф3К10М3 в водных растворах нейтральных солей сернокислого натрия, азотнокислого натрия и хлористого натрия с концентрацией 10 %. Установлено, что наибольшая производительность процесса анодного растворения быстрорежущей стали P12Ф3К10М3 происходила в 10 % водном растворе нейтральной соли NaCl с наибольшим значением плотности тока $i = 34,91 \text{ А/см}^2$ при потенциале $\varphi = 6,5 \text{ В}$.

Ключевые слова: электролит, электрохимическая обработка, быстрорежущие стали.

Введение

В машиностроительном производстве из быстрорежущей стали изготавливают режущий инструмент, работающий в условиях значительного нагружения, нагрева рабочих кромок и больших скоростях резания. Легирующие элементы, входящие в состав сталей, определяют не только уникальные свойства материала, но и сложность его механической обработки. Применение традиционных методов обработки (шлифование) инструмента из быстрорежущих сталей в закаленном состоянии зачастую приводит к появлению дефектов, снижающих его работоспособность. К таким дефектам следует отнести прижоги и микротрещины [1]. Для исключения возможности образования подобных дефектов необходимо использовать электрофизические и электрохимические методы обработки, а именно электрохимическую размерную обработку.

Электрохимическая обработка основана на анодном растворении металлов и сплавов в токопроводящей среде (электролите). В процессе анодного растворения электролит выполняет следующие функции:

- является токопроводящей средой, необходимой для протекания электрохимических процессов;
- удаляет из межэлектродного промежутка (рабочей зоны) продукты растворения (шлам) и образующиеся газы;
- охлаждает электроды при электрохимической обработке.

На основании анализа перечисленных функций можно сформулировать следующие требования, предъявляемые к электролитам [2 – 6]:

- высокая растворимость и большая степень диссоциации, необходимые для обеспечения всех электрохимических реакций катионов и анионов;
- высокая активирующая способность анионов электролита;
- образование нерастворимых продуктов реакции, что исключает резкое снижение скорости процессов электрохимического растворения из – за насыщения продуктами реакций электролита;
- высокая электропроводность, необходимая для уменьшения омических потерь при прохождении тока через электролит;
- небольшая вязкость, требуемая для облегчения движения электролита через межэлектродный зазор;
- максимальная стабильность, необходимая для обеспечения незначительного изменения свойств электролита (рН, вязкость) в процессе электрохимической обработки;
- отсутствие побочных реакций, снижающих показатель производительности электрохимической обработки (выход по току).

Для того чтобы электрохимическая обработка проходила с высокой производительностью необходимо выбрать оптимальный электролит [7]. Наибольшим значением электропроводности обладают водные растворы кислот и щелочей, но существует много факторов ограничивающих их применение в электрохимии. Такими факторами являться дополнительные затраты на оборудование (из-за агрессивной среды срок службы оборудования резко сокращается), вредное воздействие на рабочий персонал. Для безопасности проведения работ следует применять нейтральные растворы неорганических солей (рН = 7) [8, 9]. Еще одним важным показателем электролита является концентрация раствора, которая характеризует содержание выбранных компонентов в воде. Электролиты при определенной концентрации становятся насыщенными, что приводит к нестабильности электрохимического процесса и быстрому износу инструмента и оборудования [9]. Таким образом, концентрация электролита подбирается с учетом максимальной производительности процесса, но при этом учитывается его стабильность.

Целью исследования является методика выбора электролита для электрохимической обработки быстрорежущей стали P12Ф3К10М3. Задачей исследования является определение особенностей анодного растворения быстрорежущей стали P12Ф3К10М3 при экспериментальных исследованиях в 10 % водных растворах нейтральных солей NaCl (ГОСТ 4166 – 76), NaNO₃ (ГОСТ 13830 – 84) и Na₂SO₄ (ГОСТ 4168 – 79).

Методика экспериментального исследования

В качестве материала для электрохимического растворения была выбрана закаленная быстрорежущая сталь P12Ф3К10М3 (ГОСТ 19265 – 73). Исследование проводилось на экспериментальной установке (рис. 1) с использованием потенциостата Elins P – 20X.

Потенциал анода изменялся в диапазоне от 0 до 8 В. Эксперименты проводились в трехэлектродной электрохимической ячейке. В качестве электролита для поляризационных исследований были выбраны 10 % водные растворы нейтральных солей хлористого натрия (NaCl), сернокислого натрия (Na₂SO₄) и азотнокислого натрия (NaNO₃), удельная электропроводность которых представлена в табл. [10].

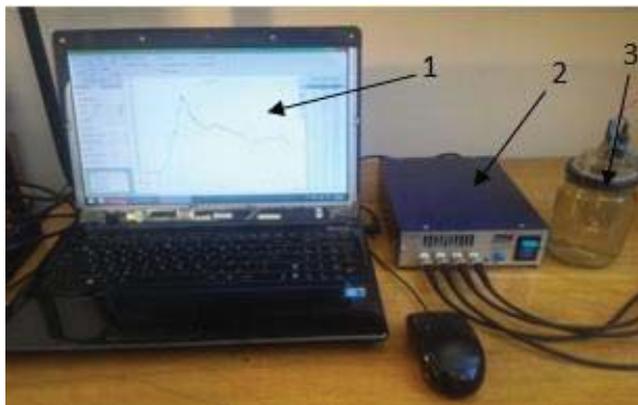


Рис.1. Экспериментальная установка для поляризационных исследований:
1 – компьютер; 2 – потенциостат; 3 – трехэлектродная ячейка

Удельная электропроводность электролитов при температуре 18⁰ С

| Вещество | Концентрация, % | Удельная электроемкость, χ $\text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ |
|---|-----------------|--|
| Na ₂ SO ₄ (сернокислый натрий) | 10 | 6,87 |
| NaNO ₃ (азотнокислый натрий) | 10 | 7,82 |
| NaCl (хлористый натрий) | 10 | 12,11 |

Результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены поляризационные характеристики электрохимического растворения быстрорежущей стали P12Ф3К10М3 в водных растворах нейтральных солей NaCl, Na₂SO₄, NaNO₃ (рис. 2).

Растворение в 10 % водном растворе NaCl исследуемой стали P12Ф3К10М3 (рис. 2, кривая 1) происходит в активном состоянии в диапазоне потенциалов от 1,5 до 6,5 В, о чем свидетельствует непрерывное увеличение плотности тока с повышением потенциала анода. Наблюдается участок пассивации в диапазоне потенциалов от 6,5 до 8 В, связано это с образованием окисной пленки на поверхности анода.

Анодное растворение многокомпонентной стали P12Ф3К10М3 в водном растворе 10 % NaNO₃ (рис. 2, кривая 2) на участке от 0 до 7 В происходит в активном состоянии материала, о чем свидетельствует увеличение плотности тока, а в области потенциалов $\varphi = 7 - 8$ В происходит стабилизация процесса, что связано с образованием оксидной пленки на поверхности обрабатываемого металла. Растворение стали в водном растворе 10 % Na₂SO₄ (рис. 2, кривая 3) происходит в активном состоянии в диапазоне потенциалов от 0 до 7,5 В, о чем свидетельствует непрерывное увеличение плотности тока с повышением потенциала анода. Вероятно, анион SO_4^{2-} препятствует образованию окисной пленки на поверхности стали, вытесняя тем самым кислород. В диапазоне потенциалов $\varphi = 7,5 - 8$ В плотность тока постоянна, что свидетельствует о пассивном рас-

творении материала. Следует отметить, что наибольшая плотность тока у многокомпонентной быстрорежущей стали P12Ф3К10М3 в растворе 10 % хлористого натрия ($i = 34,91 \text{ A/cm}^2$) в потенциале $\varphi = 6,5 \text{ В}$.

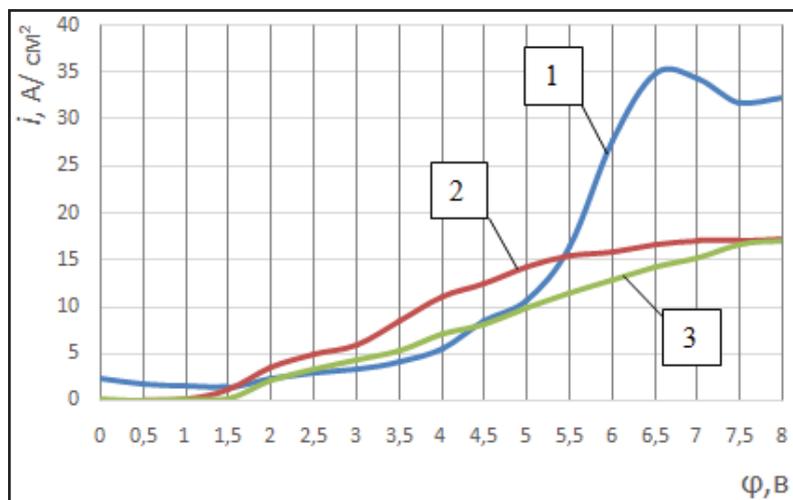


Рис. 2. Потенциодинамические поляризационные кривые анодного растворения быстрорежущей стали P12Ф3К10М3 в водных растворах нейтральных солей: 1 – 10% NaCl; 2 – 10% NaNO₃; 3 – 10% Na₂SO₄

Выводы

Анализ полученных результатов позволил определить электролит для электрохимической обработки быстрорежущей стали P12Ф3К10М3. Экспериментальные исследования проводились на потенциостате в диапазоне потенциалов от 0 до 8 В. Установлено, что хлорид натрия относится к «активирующим электролитам», которые характеризуются высокой производительностью процесса, о чем свидетельствует наибольшая плотность тока $i = 34,91 \text{ A/cm}^2$ в растворе 10 % при потенциале $\varphi = 6,5 \text{ В}$. Выявлено, что электролиты Na₂SO₄ и NaNO₃ по сравнению с NaCl являются менее производительными. Установлено, что в растворах сернокислого и азотнокислого натрия поляризационные кривые анодного растворения равномерно возрастают с увеличением потенциала анода и достигают наибольшего значения плотности тока в потенциале 7,5 В (Na₂SO₄ ($i = 16,95 \text{ A/cm}^2$) и NaNO₃ ($i = 17,24 \text{ A/cm}^2$)).

Список литературы

1. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В. Анодное растворение быстрорежущей стали P6M5 и ее составляющих в водных растворах // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2003. - № 4. – С. 141 – 147.
2. Дамаскин Б.Б. Электрохимия: учеб. для вузов / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий, Г.А. Цирлина. – М.: Химия, 2001. – 624 с.
3. Вишницкий А.Л. Электрохимическая и электромеханическая обработка металлов / А.Л. Вишницкий, И.З. Ясногородский, И.П. Григорьчук. – Л.: Машиностроение, 1971. – Вып.3. – 211 с.
4. Скорчеллетти В.В. Теоретическая электрохимия / В.В. Скорчеллетти. – Л.: ГОСХИМИЗДАТ, 1963. – 609 с.

5. Коваленко, В.С. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / В.С. Коваленко. – Киев: Вища шк., 1975. – 236 с.
6. Лившиц А.Л. Научно-технические направления развития электрофизических и электрохимических методов размерной обработки // В кн.: Материалы 17 Международ. симпоз. по электр. методам обраб. материалов. ИСШ-4. Братислава, 1974. – С. 245 – 250.
7. Рахимьянов Х.М., Василевская С.И. Выбор электролитов для электрохимической обработки отверстий малого диаметра в меди. // Научные технологии в машиностроении. 2017. - № 4(70). – С. 17 – 24. – doi: 10.12737/article_58ef80901e6c46.92255316.
8. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – 2-е издание, перераб. и доп. – М.: МИСИС. - 1999. – 408 с.
9. Мороз И.И. и др., Электрохимическая обработка металлов. М., «Машиностроение», 1969. – 208 с.
10. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки // Г.Л. Амитан, И.А. Байсупов, Ю. М. Барон и др.; Под общ. Ред. В.А. Волосатова. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, - 1988. – 719 с.

THE CHOICE OF ELECTROLYTE FOR ELECTROCHEMICAL PROCESSING OF QUICK CUTTING STEELS R12F3K10M3

Yanpolskiy V.V. C.Sc. (Engineering), e – mail: yanpolskiy@corp.nstu.ru

Ivanova M.V., Ph.D. student, e – mail: ivanova777888@yandex.ru

Kadyrbayev R.M., Ph.D. student, e – mail: kadyrbaev.2013@corp.nstu.ru

Zhuravleva A.V., M.Sc., e – mail: a.zhuravleva.2011@stud.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, prospect K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

It has been discussed method the choice for electrochemical processing of quick cutting steel R12F3K10M3. It has been conducted polarizing researches of anode dissolution of steel R12F3K10M3 in water solutions of neutral salts of sulfate sodium, nitrate sodium and chloride sodium with concentration in 10%. It has been established what the largest productivity of process of anode dissolution of quick cutting steel R12F3K10M3 the greatest value of current density of $i = 34,91 \text{ A/cm}^2$ at dissolution of quick cutting steel R12F3K10M3 in water solution of NaCl was reached.

Keywords: electrolytes, electrochemical processing, quick cutting steel.

УДК 620.179.14

**КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ
МАШИН В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ
СПЕКТРАЛЬНО – АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

*АБАБКОВ Н. В., канд. техн. наук,
СМИРНОВ А. Н., доктор техн. наук, профессор
(КузГТУ, г. Кемерово, Россия)*

Абабков Н.В. – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28,
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
е – mail: n.ababkov@rambler.ru

Аннотация

Исследованы образцы металла оригиналов и аналогов таких деталей как распределительный вал, шток поршня гидроцилиндра, поршень двигателя внутреннего сгорания разрушающими и неразрушающими методами контроля. Для всех групп исследованных деталей установлен значительный разброс данных по химическому составу металла, твердости и характеристикам неразрушающего контроля. Сопоставлены результаты исследования образцов металла разрушающими и неразрушающими методами контроля, которое показало, что спектрально-акустический метод неразрушающего контроля может быть применен для контроля качества ответственных деталей машин в условиях импортозамещения.

Ключевые слова: спектрально – акустический метод контроля, импортозамещение, химический состав, твердость, контроль качества.

Введение

Обеспечение долговечности деталей машин является важной задачей современного машиностроения, которая в существенной мере определяется качеством поверхностного слоя [1]. При этом необходимо решать проблемы повышения надежности приборов, установок, повышение их качества и эффективности работы, а, следовательно, вопросы экономии металлов, борьбы с коррозией и износом деталей машин [1]. Особенно это важно в настоящее время в период импортозамещения. Во многих отраслях промышленности эксплуатируется иностранная техника, оригинальные запасные части для которой нет возможности приобрести. Поэтому предприятия, эксплуатирующие данную технику, начинают искать производителей аналогов запасных частей. Довольно часто металл таких аналогов оказывается некачественным, что приводит к поломке запасных частей в гораздо более ранний срок [2].

В связи с тем, что комплекс эксплуатационных характеристик и ресурс изделий закладывается на стадии их производства, то чрезвычайно важным является контроль качества исходных материалов. Именно контроль механических свойств на стадии изготовления должен являться первоочередным в реализации комплексной программы диагностики объектов в процессе их эксплуатации, так как только в этом случае можно зафиксировать тенденцию изменения тех параметров, от которых зависит остаточный ресурс. В настоящее время известны два основных направления при оценке физико-механических характеристик металлических изделий: разрушающее и неразрушающее [3].

Оценка физико – механических характеристик материала с помощью разрушающего контроля необходимо строго выполнять условия проведения испытаний, которые изложены в стандартах или в других нормативных документах. При отклонении от принятых условий испытаний неизбежны погрешности. Недостатком данного контроля является то, что это длительный процесс, который приводит к разрушению испытуемого образца. Неразрушающий контроль устраняет данные недостатки, поэтому неразрушающий контроль и диагностика являются приоритетными направлениями в задачах обеспечения контроля физико-механических свойств металла изделий [1].

Методы неразрушающего контроля, применяемые в настоящее время, используются в основном для обнаружения существующих дефектов и не позволяют, в необходимой мере, определять степень изменения структуры. В этом отношении перспективны акустические и магнитные методы. Однако многие детали машин изготавливаются не из ферромагнитных материалов, что не дает возможности контролировать их магнитными методами. Поэтому акустические методы, в том числе спектрально – акустический метод, в этом отношении являются универсальными. Измеряемые характеристики, такие как время и скорость задержки поверхностных акустических волн и, чувствительны к изменениям структуры металла и зарождению микрповреждений, а также имеют связь с механическими свойствами материалов [3]. Кроме того, многие детали машин изготавливаются не из ферромагнитных материалов, что не дает возможности контролировать их магнитными методами.

Материал и методики исследования

В настоящей работе исследованы образцы металла оригиналов и аналогов таких деталей как распределительный вал, шток поршня гидроцилиндра, поршень двигателя внутреннего сгорания (рис. 1, а – в) разрушающими и неразрушающими (спектрально-акустический метод) методами контроля.



а)



б)



в)

Рис. 1. Общий вид рассматриваемых деталей:
а – распределительный вал; б – поршень гидроцилиндра;
в – поршень двигателя внутреннего сгорания

Химический состав металла исследуемых деталей определяли при помощи оптико-эмиссионного спектрометра Q4 Tasman. Твердость металла измеряли при помощи универсального твердомера DuraVision-30.

Время и скорость задержки поверхностных акустических волн определяли измерительно-вычислительным комплексом «АСТРОН» (рис. 2), который предназначен для оценки физико-механических характеристик и напряженно – деформированного состояния материала ответственных элементов различных технических объектов [4].

В основу работы аппаратной части комплекса положен способ учета всей серии отраженных акустических импульсов для последующей ее обработки средствами программного обеспечения комплекса. В обрабатываемую часть системы производится последовательное преобразование осциллограммы отраженных импульсов с определенным шагом дискретизации с момента зондирования исследуемого материала и до прихода n -го отраженного импульса для передачи первичной акустической информации. С комплексом «АСТРОН» используются преобразователи поверхностных волн, которые представляют собой выполненные в одном корпусе излучатель и приемник волн. В настоящей работе использовался преобразователь на 4 МГц с базой 18 мм (рис. 3).



Рис. 2. Внешний вид системы измерительно – вычислительного комплекса «АСТРОН»

Датчик состоит из двустороннего клина из оргстекла 1 с углом ввода ультразвука 27° (для объектов контроля из стали), излучателя 2 и приемника 3 релеевских волн с центральной частотой 5 МГц. База (расстояние между поверхностями излучения и приема) может варьироваться в широких пределах в зависимости от геометрических размеров зон измерения.

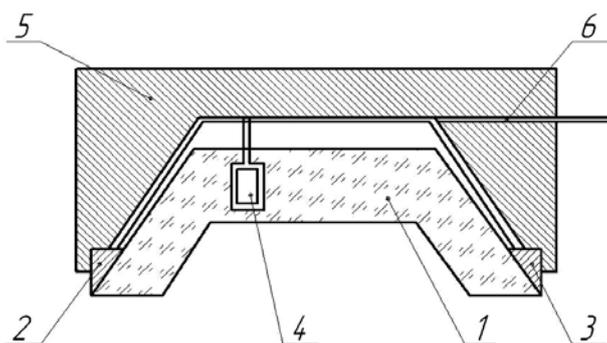


Рис. 3. Малобазный релеевский датчик:
 1 – двусторонний клин из оргстекла; 2 – излучатель релеевских волн;
 3 – приемник релеевских волн; 4 – излучатель – приемник термоимпульсов;
 5 – корпус; 6 – высокочастотный кабель

Обсуждение результатов

Для таких деталей как поршни гидроцилиндров установлены различия по химическому составу металла между оригиналом и аналогами. По паспорту оригинал изготавливается из стали SM45C (сталь 45). Из аналогов наиболее близким оказался вариант, изготовленный из материала, наиболее соответствующего стали 50. Таким образом отклонение по содержанию С между оригиналом аналогами составило более 5%. По твердости существенных различий выявлено не было, а время задержки поверхностных акустических волн менялось в пределах от 4691 нс в металле оригинала до 4702 нс в металле аналогов.

Для распределительных валов также установлено весьма существенное различие по химическому составу металла между оригиналом и аналогами. В частности, содержание С составляет 0,158 %, а Mn – 1,174 % в металле оригинала, тогда как в металле аналогов содержалось С – 0,842 %, а Mn – 0,73 %. Твердость на наружной поверхности составляет в среднем 52,5 HRC для оригинала и 59,8 HRC для аналогов, что свидетельствует о нарушениях в механической и термической обработке деталей аналогов. Характеристики, измеренные спектрально-акустическим методом, также имели разброс значений в зависимости от варианта изготовления детали. Время задержки поверхностных акустических волн менялось в пределах от 4683 нс в металле оригинала до 4750 нс в металле аналогов.

Материалу оригинала поршня двигателя внутреннего сгорания наиболее соответствует сплав АК12. Из шести фирм аналогов наиболее близкими по химическому составу оказались только две. Для четырех других отклонение по содержанию Si между оригиналом и аналогами составило 7 % до 21 %. По твердости существенных различий между оригиналом и аналогами выявлено не было, а время задержки поверхностных акустических волн менялось в пределах от 4473 нс в металле оригинала до 4812 нс в металле аналогов.

Выводы

В работе исследованы образцы металла оригиналов и аналогов таких деталей как распределительный вал, поршень гидроцилиндра, поршень двигателя внутреннего сгорания разрушающими и неразрушающими методами контроля. Установлено, что для всех групп исследованных деталей наблюдается значительный разброс данных по химическому составу металла, твердости и характеристикам неразрушающего контроля. Это дает основание рекомендовать производителям и поставщикам деталей более ответственно подходить к входному контролю качества. Проведено сопоставление результатов исследования образцов металла разрушающими и неразрушающими методами контроля, которое показало, что спектрально-акустический метод неразрушающего контроля может быть применен для контроля качества ответственных деталей машин в условиях импортозамещения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ, соглашение № 14 – 19 – 00724 и гранта Президента РФ для поддержки молодых кандидатов наук, МК – 1341.2017.8.

Список литературы

1. Горкунов, Б. М. Анализ методов и устройств для контроля упрочненного слоя металлических изделий / Б. М. Горкунов, А. А. Тищенко // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Электроэнергетика та перетворювальна техніка, №12 – Вестник НТУ «ХПИ», 2010. – С. 128 – 135.

2. Абабков, Н. В. Применение спектрально-акустического метода для контроля упрочненного поверхностного слоя металлических изделий / Н. В. Абабков, Е. Е. Петрова // Инновации в машиностроении: материалы VII МНПК. – Кемерово: КузГТУ, 2015. – С. 220 – 223.
3. Фольмер, С.В. Разработка технологии оценки ресурса сварных соединений трубопроводов с применением спектрально-акустического метода / автореф. на соиск. степ. канд. техн. наук. – Барнаул, 2009. – 19 с.
4. Смирнов, А. Н. Использование УЗ-сигналов для идентификации НДС / А. Н. Смирнов, В. Ю. Блюменштейн, А. А. Кречетов, Н. А. Хапонен // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – С. 32 – 36.

THE APPLICATION OF SPECTRAL – ACOUSTIC METHOD OF CONTROL FOR HARDENED SURFACE LAYER OF METAL PRODUCTS

Ababkov N.V., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e – mail: n.ababkov@rambler.ru

Smirnov A.N., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: galvas.kem@gmail.com

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Abstract

Samples of originals and analogs of such details as the camshaft, piston rod of the hydraulic cylinder, the piston of the internal combustion engine are destroyed by destructive and non-destructive methods of control. For all groups of investigated details, there is a wide range of data on the chemical composition of the metal, hardness, and characteristics of non-destructive testing. The results of the study of metal samples by destructive and non-destructive methods of control are compared, which showed that the spectral-acoustic method of nondestructive testing can be used to control the quality of the responsible machine parts under conditions of import substitution.

Keywords: spectral-acoustic method of control, Import substitution, chemical composition, hardness, quality control.

УДК 536.253

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СТОЛБА СВАРОЧНОГО ДЫМА

*ДРУЗЬ О. Н., канд. техн. наук, доцент
(ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)*

Друзь О. Н. – 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20 а,
ГОУ ВПО «Луганский национальный университет им. В. Даля»,
e – mail: druz238@gmail.com

Аннотация

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований пространственных закономерностей столба сварочного дыма. Показано, что сварочный аэрозоль, содержащийся в столбе дыма, является основной причиной профессиональных заболеваний сварщиков. Для практических целей принят ряд допущений о том, что сварочный факел представляет собой свободный конвективный поток в виде конуса от точечного источника тепла. Определены основные пространственные закономерности конвективного потока, которые зависят от режима дуговой сварки. Проведены экспериментальные исследования по определению угловых размеров столба сварочного дыма. Указаны направления дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

Ключевые слова: дуговая сварка, столб сварочного дыма, конвективный поток, пространственные закономерности.

Введение

При дуговых способах сварки возникает вредный фактор – сварочный аэрозоль (СА). Воздействие СА приводит к возникновению профессиональных заболеваний, среди которых 80 % представляют бронхо – легочные – пневмокониоз, который выявляется у сварщиков, проработавших в сварочных цехах более 15 лет, и хронический бронхит, возникающий уже через 5 лет работы по профессии сварщика. Кроме того, влияние СА на органы дыхания может повышать риск развития онкологических заболеваний (рака). Средний стаж работы по специальности у сварщиков, получивших инвалидность по профзаболеванию, согласно данным клиники Института медицины труда составляет около 18 лет, в том числе у сварщиков, занятых ручной дуговой сваркой, – 21 год, у работающих на полуавтоматах – 14 лет [1, 2].

Источником СА является столб сварочного дыма (сварочный факел), который представляет собой конвективный поток, образующийся от теплоты дуги и нагретой детали [9]. Следовательно, возникает необходимость исследования пространственных закономерностей столба сварочного дыма при дуговых способах сварки, что позволит выбрать необходимое расстояние до вытяжных устройств, для обеспечения безопасных условий работы сварщика (отсутствия СА в зоне дыхания).

Целью работы является определение основных зависимостей (моделирование) пространственных параметров столба дыма при дуговых способах сварки. Задачами исследований является определение теоретических пространственных закономерностей столба сварочного дыма и их экспериментальная проверка.

Описание теоретических или экспериментальных исследований

В первом приближении определим пространственные параметры столба сварочного дыма, как конвективного потока. Рассмотрим идеальные условия: сварка (наплавка шва) осуществляется штучным электродом на горизонтальной поверхности (массивное металлическое изделие), т.е. источник тепла точечный; какие – либо другие воздушные потоки отсутствуют – сварка в спокойной воздушной атмосфере; атмосфера, в которой распространяется сварочный дым, ничем не ограничена.

Закономерности распространения конвективных потоков в воздухе изучались в работах [3 – 9]. Анализ данных работ позволяет определить пространственные закономерности столба сварочного дыма. В вышеуказанных работах указано, что характерной особенностью для конвективных струй является внешнее расширение струи на $\alpha = 22...24^\circ$. Высота сварочного факела по данным [9] может достигать $h = 5000$ (мм).

Конус (модель сварочного факела) условно делят на три зоны (рис. 1).

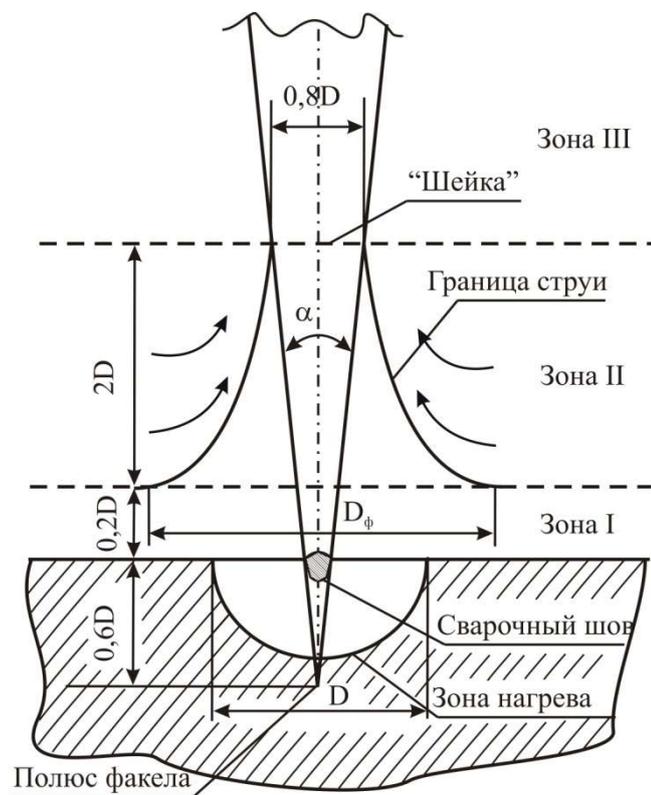


Рис. 1. Схема столба сварочного дыма над источником тепла (сварочным швом)

Первая зона расположена непосредственно у нагретой поверхности – это пограничный участок, состоящий из ламинарного подслоя, расположенного непосредственно у нагретой пластины, и основного пограничного слоя. Высота этой зоны составляет приблизительно $0,2 D$ (D – диаметр источника тепла).

Например, в соответствии с теорией тепловых расчетов Рыкалина Н.Н. при режимах сварки $I_{св} = 200$ (А), $U_d = 20$ (В), $V_{св} = 7$ (м/ч), диаметр источника тепла составит $D \approx 120$ (мм). Следовательно, высота зоны I составит 24 (мм).

$D_ф$ – диаметр сварочного факела в разгонном участке, может быть определен по формуле [9]:

$$D_{\phi} = 0,08 \lg I_{\text{св}}, \quad (\text{м}). \quad (1)$$

Подставив численные значения в формулу (1) получим $D_{\phi} = 0,154 \text{ (м)} = 154 \text{ (мм)}$.

Вторая зона – участок разгона струи, где наблюдается некоторое сужение струи в результате слияния отдельных струек и их ускоренного движения. Высота участка достигает $2 D$, т.е. около 240 (мм).

Третья зона называется основным участком. Она характеризуется сформировавшимися профилями скоростей и температур, ее высота может достигать 5000 (мм).

Результаты и обсуждение

Теоретические пространственные закономерности столба сварочного дыма, как конвективного воздушного потока, представленные в работах [1 – 9] нормально согласуются с экспериментальными. Однако, закономерность внешнего расширения струи в указанном узком диапазоне, причем не зависимо от режимов сварки, вызвала сомнения и была проверена экспериментально. Исследовались фотоснимки столбов сварочного дыма при ручной дуговой сварке штучным электродом (РДС) и при полуавтоматической сварке в средах активных и инертных газов на различных режимах. Результаты определения угла внешнего расширения столба сварочного дыма представлены в таблице.

Результаты определения угла внешнего расширения столба сварочного дыма (в град.)

| № п/п | Способ сварки | |
|-------|---------------|--------------------|
| | РДС | полуавтоматическая |
| 1 | 33 | 33 |
| 2 | 29 | 25 |
| 3 | 30 | 25 |
| 4 | 26 | 31 |
| 5 | 26 | 23 |
| 6 | 24 | 20 |
| 7 | 21 | 20 |
| 8 | 32 | 34 |
| 9 | 30 | |
| 10 | 30 | |
| 11 | 32 | |
| 12 | 30 | |

Анализ результатов таблицы показал, что при РДС угол внешнего расширения столба сварочного дыма находится в диапазоне от 21° до 33° , при полуавтоматической сварке – от 20° до 34° . Таким образом, видно, что при дуговых способах сварки фактические значения угла внешнего расширения в большинстве случаев превосходят теоретические в среднем на 25 %. Превышение значений можно объяснить неучтенными внешними факторами, такими как: сварка на форсированных режимах, подача в зону сварки струи защитного газа, перемещением воздуха на рабочем месте сварщика (сквозняк, вентиляционные потоки). Зависимость угла внешнего расширения от режимов сварки и внешних факторов требует дальнейшего изучения.

Выводы

1. Сварочный аэрозоль, содержащийся в столбе сварочного дыма, является одной из причин профессиональных заболеваний сварщиков.
2. Основные пространственные закономерности столба сварочного дыма как конвективного потока нормально согласуются с экспериментальными данными (разделение столба на три зоны).
3. При дуговых способах сварки фактические значения угла внешнего расширения столба сварочного дыма в большинстве случаев превосходят теоретические в среднем на 25 %, что говорит о необходимости дальнейших исследований.

Список литературы

1. Гришагин В.М. Сварочный аэрозоль: образование, исследование, локализация, применение: монография / В.М. Гришагин; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с. – ISBN 978 – 5 – 98298 – 896 – 6.
2. Левченко О.Г. Охорона праці у зварювальному виробництві : навч. посібн. для студентів зварювальних спеціальностей / О.Г. Левченко. – К.: Основа, 2010. – 240 с. – ISBN 978 – 966 – 699 – 520 – 2.
3. Посохин В.Н., Зиганшин А.М. Численное моделирование конвективных течений над протяженными теплоисточниками // Известия КГСАУ. 2005. №1(3). С. 136 – 140.
4. Вульфсон А.Н., Бородин О.О. Автомодельные режимы распространения нестационарной высокотемпературной конвективной струи в адиабатической атмосфере // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42, №2. С. 81 – 87.
5. Килин П.И., Рогова Т.Н. Расчет и устройство вытяжных зонтов. Уч. пособ. Екатеринбург: УрГУПС. 2005. 72 с.
6. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции: Учеб. пособие для вузов. М.: Стройиздат. 1979. 295 с.
7. Шепелев И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. М.: Стройиздат. 1978. 144 с.
8. Гримитлин М.И. Вентиляция и отопление цехов судостроительных заводов. Изд. 2 – е, перераб. и дополн. Л.: Судостроение. 1978. 239 с.
9. Писаренко В.Л., Рогинский М.Л. Вентиляция рабочих мест в сварочном производстве. М.: Машиностроение. 1981. 120 с.

**RESEARCH OF SPATIAL REGULARITIES OF THE COLUMN OF
THE WELDING SMOKE**

Druz O. N., C.Sc. (Engineering), Associate professor, e – mail: druz238@gmail.com

Lugansk national university of a name of Vladimir Dahl, Molodezhny quarter, 20-a, Lugansk, 91034, Luhansk People's Republic

Abstract

Results of theoretical and pilot studies of spatial regularities of a column of a welding smoke are presented. It is shown that the welding aerosol containing in a column of a smoke, is the main reason for occupational diseases of welders. A number of assumptions that the welding torch represents a free convective stream in the form of a cone from a dot source of heat is for practical purposes accepted. The main spatial regularities of a convective stream which depend on a mode of arc welding are defined. Pilot studies by determination of the angular sizes of a column of a welding smoke are carried out. The directions of further pilot and theoretical studies are specified.

Keywords: arc welding, column of a welding smoke, convective stream, spatial regularities.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ТОЧЕНИЯ КАПРОЛОНА

*ЕРЕНКОВ О. Ю., доктор техн. наук, профессор,
КОНОБЕЙСКАЯ А. В., старший преподаватель
(Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия)*

Еренков О.Ю. – 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136,
Тихоокеанский государственный университет,
е – mail: erenkov@list.ru

Аннотация

В данной работе целью исследования является сравнительный анализ токарной обработки капролона с применением сменных многогранных пластин, выполненных из различного материала, а именно: одна пластина выполнена из вольфрамокобальтового сплава ВК8, другая из керамического материала – безвольфрамового твердого сплава КНТ16. Основу экспериментальной установки составляет лабораторно – исследовательский стенд STD.201 – 2, который применяется для исследования динамики технологической системы станок – приспособление – инструмент – заготовка и регистрации сил резания при токарной обработке. Экспериментально доказано, что токарная обработка капролона как режущей пластиной из сплава ВК8, так и пластиной из керамического материала КНТ16 является стабильным процессом. Установлено экспериментально, что для обработки заготовок из капролона целесообразно применять сменные режущие пластины из керамического материала КНТ16, при этом при скорости резания 300 м/мин применение керамической пластины является более предпочтительным по сравнению с пластиной из твердого сплава ВК8, о чем свидетельствует тип полученной стружки.

Ключевые слова: капролон, точение, режущий инструмент, безвольфрамовый твердый сплав, сила резания, стружкообразование.

Введение

Одним из технических решений, реализация которого позволит повысить качество изготовления изделий из полимерных композиционных материалов, а также понизить их себестоимость является правильный выбор материала режущего инструмента и учет силовых параметров в процессе обработки. Традиционно для обработки ПКМ, в том числе и капролона, применяют инструменты на основе вольфрамокобальтовых, так называемых «твердых» сплавов типа ВК6 и ВК8. В настоящее время для обработки металлических материалов и сплавов резанием активно применяется режущий керамический инструмент [1, 2]. Режущая керамика характеризуется высокой твердостью, в том числе при нагреве, износостойкостью, химической инертностью к большинству металлов в процессе резания. По комплексу этих свойств керамика существенно превосходит традиционные режущие материалы – быстрорежущие стали и твердые сплавы [3 – 5].

В данной работе целью исследования является сравнительный анализ токарной обработки капролона с применением сменных многогранных пластин, выполненных из различного материала.

Методика проведения экспериментальных исследований

В качестве исследуемого материала был выбран капролон, конструкционный полимер, широко используемый в машиностроении благодаря своим антифрикционными свойствам, износостойко

сти, высокой механической прочности и хорошей способностью к обработке резанием. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Основу экспериментальной установки составляет лабораторно – исследовательский стенд STD.201 – 2, который применяется для исследования динамики технологической системы станок-приспособление – инструмент – заготовка и регистрации сил резания при токарной обработке. Функционально стенд состоит из головки – резцедержателя, интерфейсного блока, модуля подключения датчиков, персонального компьютера. Диапазон измерений динамических нагрузок лабораторного стенда STD.201 – 2 от 0 до 14710 Н. Для сравнительного анализа процесса токарной обработки была выбрана наиболее важная составляющая силы резания P_z , от которой зависит качество и производительность процесса точения [6].

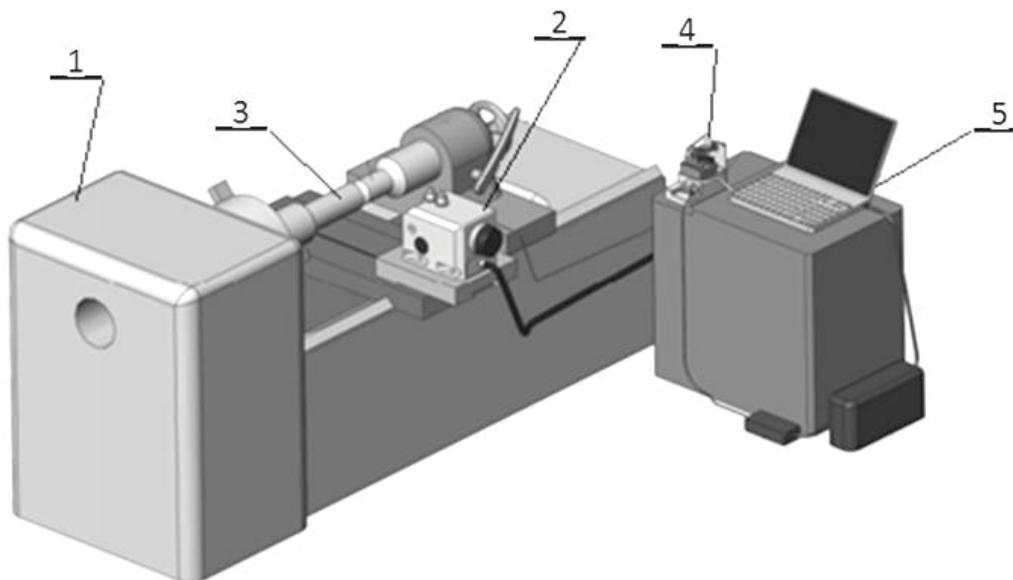


Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 – токарный станок; 2 – головка резцедержателя; 3 – заготовка,
4 – интерфейсный блок; 5 – персональный компьютер

Для токарной обработки применяли сборные резцы, которые оснащались сменными многогранными пластинами выполненными из разных инструментальных материалов, а именно: одна пластина выполнена из вольфрамокобальтового сплава ВК8, другая из керамического материала – безвольфрамового твердого сплава КНТ16. Сплав КНТ16 производится ООО «Вириал» (Россия, г. Санкт – Петербург) и имеет следующий химический состав: карбонитрид титана – 74%, никель – 19,5%, молибден – 6,5 %.

Выбранные пластины применяют для точения труднообрабатываемых материалов, к которым относятся и ПКМ, включая капролон. Режимы резания и геометрические параметры для данных пластин были выбраны исходя из рекомендаций [6].

Исследование структуры стружки капролона, полученной при разных вариантах токарной обработки, проводилось на электронном микроскопе Primo Star.

Таким образом, экспериментальные исследования содержали следующие виды научной работы: точение заготовки исследуемыми пластинами при выбранных режимах резания, регистрация силы резания, отбор стружки и исследования ее структуры, анализ полученных результатов.

Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

На рис. 2 в графическом виде представлены данные экспериментальных исследований по токарной обработке заготовок из капролона твердосплавными пластинами ВК8 и КНТ16.

Анализ полученных данных, рис. 2, позволяет сделать заключение о том, что для всех вариантов точения изменение силы резания P_z имеет место в незначительных интервалах. В таблице сведены максимальные и минимальные значения силы резания P_z для исследуемых вариантов обработки.

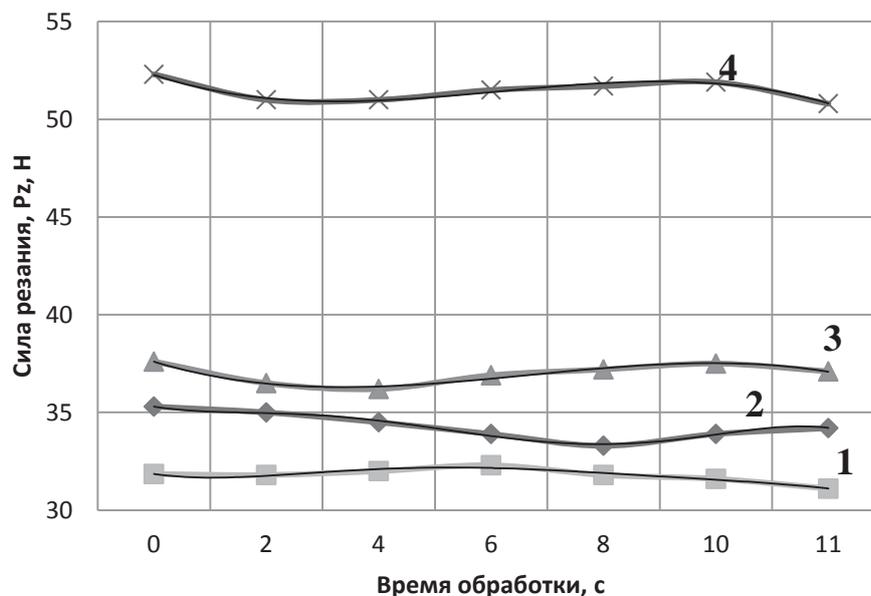


Рис.2. Сила резания при токарной обработке капролона P_z :

- 1 – пластина КНТ60, $V = 160$ м/мин; 2 – пластина ВК8, $V = 160$ м/мин;
3 – пластина ВК8, $V = 300$ м/мин; 4 – пластина КНТ60, $V = 300$ м/мин

Как следует из данных таблицы, общий интервал изменения значений силы резания P_z составляет 2,6 – 5,7 %, что позволяет с уверенностью заявить о стабильности процесса точения заготовок из капролона выбранными пластинами при вышеописанных параметрах резания. Стабильность процесса точения, в свою очередь, является убедительным подтверждением получения высокого качества обработанной поверхности детали [7].

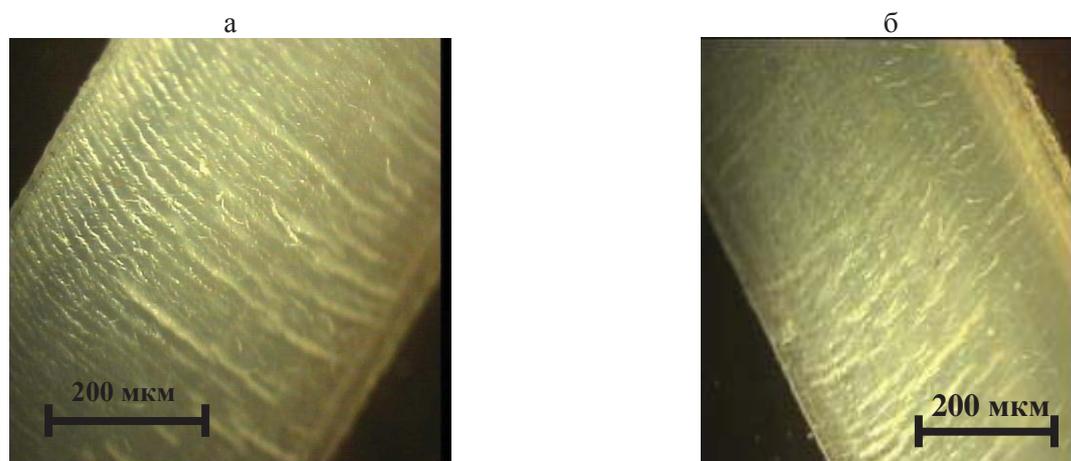
Самые высокие значения силы резания P_z наблюдаются в случае точения капролона керамической режущей пластиной при скорости резания 300 м/мин. Такой эффект можно объяснить тем, что с повышением скорости от 160 до 300 м/мин резание происходит повышение температуры в зоне резания [8]. Безвольфрамовый твердый сплав КНТ16 имеет более низкую теплопроводность по сравнению с твердым сплавом ВК, в связи с чем, тепловая нагрузка, вызванная повышением температуры в зоне резания, аккумулируется, в основном, в поверхностном слое.

Значения силы резания при точении капролона

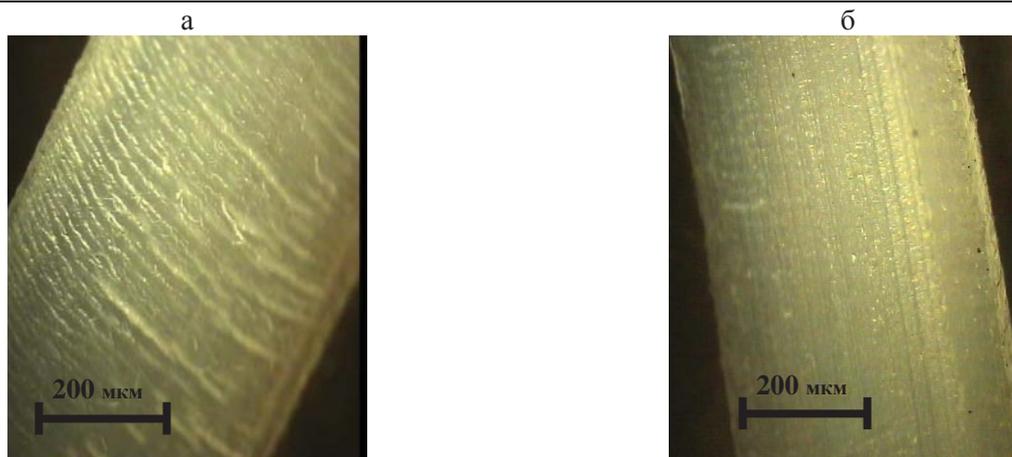
| Материал ре- жущей пла- стины | Скорость ре- зания, V , м/мин | Сила резания P_z , Н | |
|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| | | Минимальное значение | Максимальное значение |
| BK8 | 160 | 33,3 | 35,3 |
| | 300 | 36,2 | 37,2 |
| КНТ16 | 160 | 50,6 | 51,9 |
| | 300 | 31,3 | 32,3 |

материала заготовки. Материал становится более вязким и его разрушение происходит путем развития пластической деформации. При этом, соответственно, возрастает удельная работа резания, затрачиваемая на отделение срезаемого слоя и образование стружки, которое осуществляется касательными напряжениями, что и является причиной повышения силы резания P_z .

Такое предположение подтверждается электронными микрофотографиями стружек капролона, (рис. 3, 4). Анализ микрофотографий стружки показал, что характер стружкообразования при токарной обработке капролона с указанными скоростями для обеих пластин практически аналогичный. Об этом свидетельствует факт образования одного типа стружки – непрерывная скалывания, характер регулярности распределения сдвиговых элементов и их геометрические параметры. Исключение составляет вариант точения капролона пластиной из сплава КНТ16 при скорости 300 м/мин. Сдвиговые элементы стружки имеют настолько незначительные геометрические параметры, что стружку уверенно можно отнести к непрерывной сливной. Образование непрерывной сливной стружки при точении свидетельствует также о стабильности процесса резания и обеспечении высокого качества обработанной поверхности детали [6].



*Рис. 3. Стружка капролона, полученная при точении пластиной
(скорость резания 150 м/мин):
а – пластина из сплава BK 8; б – пластина из сплава КНТ 60*



*Рис. 4. Стружка капролона, полученная при точении пластиной
(скорость резания 300 м/мин):
а – пластина из сплава ВК 8; б – пластина из сплава КНТ 60*

Выводы

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований можно заключить следующее:

- экспериментально доказано, что токарная обработка капролона как режущей пластиной из сплава ВК8, так и пластиной из керамического материала КНТ16 является стабильным процессом, о чем свидетельствуют незначительные изменения значений главной составляющей силы резания, однако диапазон изменений в случае точения керамической пластиной меньше по сравнению с вариантом точения пластиной из вольфрамкобальтового сплава для выбранных режимов обработки;

- экспериментально установлено, что для обработки заготовок из капролона целесообразно применять сменные режущие пластины из керамического материала КНТ16, при этом при скорости резания 300 м/мин применение керамической пластины является более предпочтительным по сравнению с пластиной из твердого сплава ВК8, о чем свидетельствует тип полученной стружки;

- применение режущих пластин для токарной обработки полимерных материалов позволяет расширить номенклатуру используемых инструментов и повысить эффективность токарной обработки в целом.

Список используемых источников

1. Арзамасов Б.Н. *Материаловедение: учеб. для студентов вузов* / Б.Н. Арзамасов и др. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Изд-во МВТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 734 с.
2. Klocke F./ *Manufacturing Processes 1: Cutting* – Berlin: Springer-Verlag, 2011. – 504 p.
3. Верещака А.С. *Резание материалов: учебник для студентов вузов* / А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Издательство Высшая школа, 2009 г. – 536 с.
4. Smith G./ *Cutting Tool Technology: Industrial Handbook* - London: Springer-Verlag London Limited, 2008. – 559 p.
5. Davim P. / *Machining of Hard Materials* – London: Springer-Verlag London Limited, 2011. – 211 p.
6. Еренков О.Ю. *Обработка полимерных материалов резанием на основе обеспечения стабильности технологической системы и предварительных внешних воздействий на заготовки* / О.Ю. Еренков, А.Г. Ивахненко, Хосен Ри, А.В. Гаврилова. - Владивосток: Дальнаука, 2011. – 270 с.

7. Ивахненко А.Г. Предпроектные исследования металлорежущих систем/ А.Г. Ивахненко, В.В. Куц.- Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2013. – 188 с.
8. Еренков О. Ю. Комбинированные способы токарной обработки полимерных композиционных материалов /О. Ю. Еренков. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – 277 с.

STADY OF THE POSSIBILITY OF A CERAMIC CUTTING TOOL FOR CAPROLON TURNING

Erenkov O.Yu., D.Sc. (Engineering) professor, e – mail: erenkov@list.ru
Konobeyskaya A.V., Senior Lecturer, e – mail: kangel15@mail.ru

Pacific National University, 136, Tikhooceanskaya st., Khabarovsk, 680035, Russia.

Abstract

The aim of this study is a comparative analysis of turning caprolon with indexable inserts made from different materials, namely: one plate made from wolfram and cobalt alloy VK8, another from ceramic material tungsten free carbide KNT16. The basis of the experimental setup is laboratory research stand STD.201 – 2, which is used to study the dynamics of technological system machine-tool - tool - preparation and registration of the cutting forces during turning. Functionally stand consists of a head-tool holder, the interface unit, the module connecting sensors, PC. Experimentally proved that turning caprolon as a cutting plate alloy VK8 and a plate of ceramic material KNT60 is a stable process as evidenced by the slight changes of values main component of cutting force however the range of change in the case of turning the ceramic plate is smaller in comparison with the option of turning by wolfram and cobalt alloy VK8 plate for the selected processing mode. It is established experimentally that for the machining of caprolon advisable to use interchangeable cutting inserts made of ceramic material KNT16, wherein the cutting speed at 300 m / min applying the ceramic plate is preferred over the plate VK8 carbide, as indicated by the type of received chips.

Keywords: caprolon, turning, cutting tool, tungsten free alloy, cutting force, chip forming.

УДК 621.357.3

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА КОНТРОЛЯ АЛМАЗНЫХ ПОРОШКОВ

*АСКАЛОНОВА Т. А., канд. техн. наук., доцент,
ЛЕОНОВ С. Л., доктор техн. наук, профессор,
ЛУКИН Л. Н., канд. техн. наук., доцент
(АлтГТУ им. И.И.Ползунова, г. Барнаул, Россия)*

Леонов С.Л. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова,
e – mail: sergey_and_nady@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы контроля линейных параметров алмазных зёрен на базе статистических методов. Представлены замеры большого массива алмазных зёрен различных зернистостей традиционным способом и построены полигоны распределения линейных параметров. Установлено значительное превышение доли зёрен, параметры которых выходят за размер указанной зернистости основной фракции. Предложен новый метод контроля с использованием сит с круглыми ячейками. Моделирование рассева зёрен на базе стохастического моделирования показало, что предложенный метод контроля значительно сокращает количество зёрен, размеры которых превышают размер основной фракции, что подтверждается полигонами распределений. Практически вся генерация зёрен укладывается в пределы указанной зернистости.

Ключевые слова: алмазные зёрна, параметрический состав, зернистость, контрольные сита, качество, полигон распределения, генерация, стохастическое моделирование.

Введение

Качество алмазных порошков характеризуется их зерновым составом и прочностью, определяемой маркой алмаза. Алмазные зерна из синтетических алмазов представляют собой совокупность зерен различной величины и формы: монокристаллы, осколки, сrostки. При контроле алмазные зерна подразделяют на фракции. Основной фракцией называется совокупность зерен определенного размера, преобладающих (65 ÷ 70 %) в составе данного порошка по массе. Получить абразивный порошок, состоящий только из зерен одного размера, не представляется возможным, поэтому кроме основной фракции, в составе порошков содержатся побочные, которые крупнее или мельче основной, процент их тоже оговаривается в ГОСТе 9206 – 80. Так, например, для зерен алмазных шлифпорошков содержание крупной фракции должно быть не более 15 %. Размер зерен в каждой фракции определяется размерами сторон ячеек двух контрольных сит в микрометрах, из которых через верхнее сито зерна должны проходить, а на нижнем задерживаться. Зернистость порошков определяется по основной фракции и обозначается дробью, у которой числитель соответствует размеру сторон ячейки верхнего сита, знаменатель – размеру стороны ячейки нижнего сита, например, 200/160. При исследовании зернового состава порошков, размеры как правило, определяются линейными параметрами проекции зерен под микроскопом.

Полученные линейные размеры оцениваются по двум взаимно перпендикулярным направлениям. За длину зерна принимается его наибольший размер. Как известно, синтетические алмазы предварительно подвергаются дроблению, а далее уже классифицируются по размерам и фракциям ситовым методом. От размеров, формы, геометрии алмазного зерна зависят сечение срезаемой

стружки, работа деформирования обрабатываемого материала и работа трения зерен и связки о поверхность изделия, силы резания и температура [1, с. 19; 2, с. 83]. Качество обработанных поверхностей также во многом зависит от линейных размеров зерен. Вследствие этого целью данного исследования является поиск способов, повышающих однородность зернового состава и сокращение рассеяния размеров зерен.

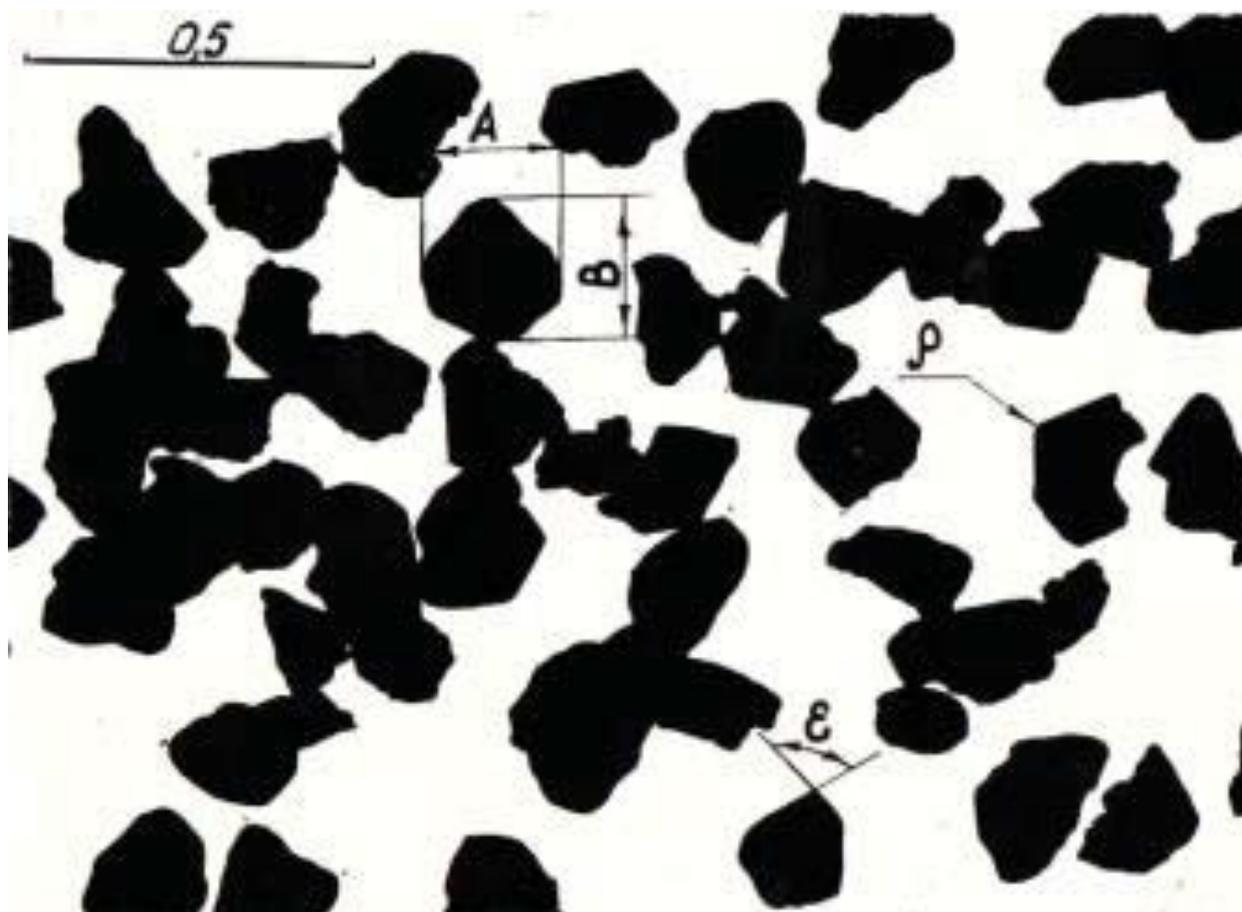


Рис. 1. Фотография алмазных зёрен, полученная при помощи микроскопа

Материал и методика исследований

Нами были проведены исследования линейных параметров алмазных зерен (длины A и ширины B (рис. 1)) в исходном состоянии после дробления и далее у зерен, извлеченных из алмазных инструментов, прошедших классификацию через контрольные сита. Изучались размеры алмазных зерен марки АС, зернистостей 160/125; 100/63; 80/63, выборка составляла не менее 300 зерен. Построенные полигоны распределения зерен и последующая математическая обработка показали следующее. Распределение размеров зерен в исходном состоянии подчиняется нормальному закону. Проверка по критерию χ^2 это подтвердила.

Кривые распределения размеров зерен, прошедших ситовой контроль, указанных зернистостей заметно отличаются от нормального (рис. 2); практически все кривые имеют смещение в сторону меньших размеров зерен. Прохождение значительного количества зёрен с размерами меньше ос

новой фракции мы объясняем тем, что измеряемые зерна были извлечены из алмазных хонинговальных брусков после их работы, таким образом часть зерен в процессе изготовления инструментов и их работы раскалываются и эти зерна имеют размеры меньше, чем размер основной фракции и проходят через второе сито. При этом поля рассеяния размеров значительно превышают диапазон зернистости по ГОСТу: у зерен АС 160/125 поле рассеяния доходит до 240 мкм, у зерен 100/80 – до 180 мкм, а у зерен АС 80/63 – до 140 мкм. Таким образом, значительное количество зерен имеют размеры намного превышающие размер крупной фракции. При этом зерен крупной фракции также оказалось заметно больше, чем 15 %, оговориваемых ГОСТом.

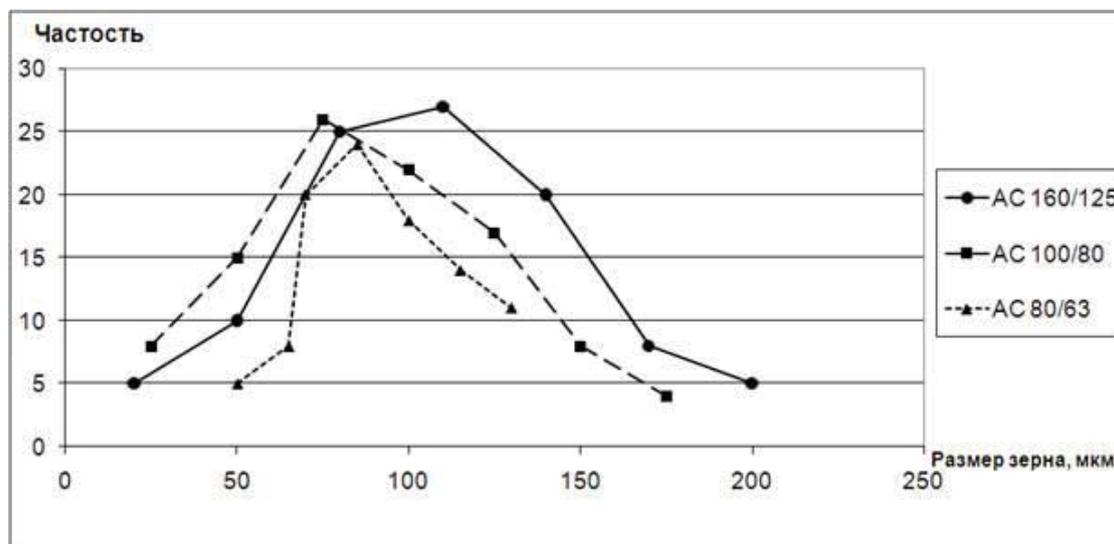


Рис. 2. Полигоны распределения размера А зёрен АС 160/125;
АС 100/63; АС 80/63

Результаты и обсуждение

Анализ полученных результатов позволил предположить, что причиной этого является квадратная форма ячеек контрольных сит. В процессе отсева с использованием вибрации через сита проходят зерна, размеры которых превышают размеры ячейки верхнего сита, так как часть зерен может пройти через них по диагонали квадрата (рис. 3а). На наш взгляд, это является причиной увеличенного количества в процентном отношении зерен с размерами крупной фракции и превышающими их. Нами была высказана гипотеза: при замене квадратной формы ячеек на ячейки круглой формы, диаметр которых будет соответствовать большему размеру зерен основной фракции, вероятность попадания зерен с размерами превышающими размер основной фракции должна уменьшиться (рис. 3б).

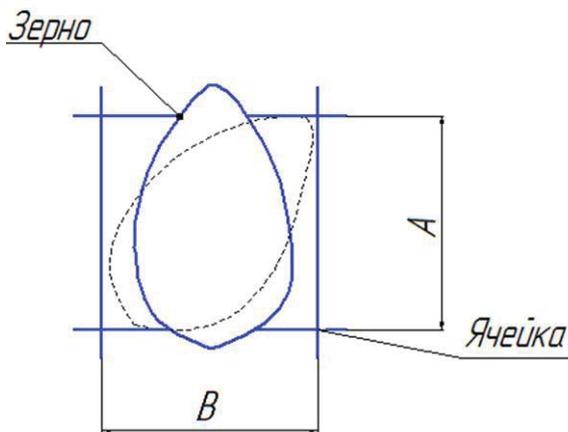


Рис. 3а

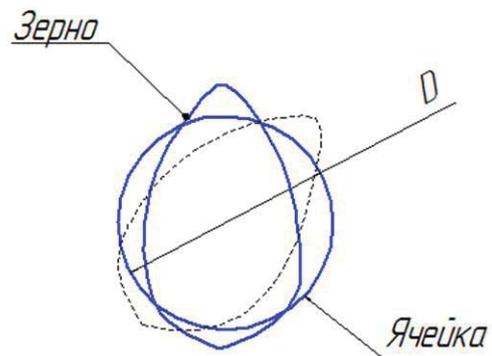


Рис. 3б

Для проверки этой гипотезы разработана математическая модель рассева зерен с использованием стохастического моделирования. Сгенерирован массив из 20000 зерен зернистостью 160/125 случайным образом по нормальному закону. Рассеяние размеров было принято в пределах поля, полученного при измерении реальных зерен АС 160/125 (рис. 2). Результаты математического моделирования приведены на рис. 4, 5а и 5б.

| Microsoft Excel - zerno | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------|-------------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---|---|----------|
| Файл Правка Вид Вставка Формат Сервис Данные Окно Справка | | | | | | | | | | | | |
| Arial Cyr 10 Шрифт Ж К Ц | | | | | | | | | | | | |
| N15 | | | | | | | | | | | | |
| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M |
| 1 | Квадратные ячейки: | | | A1 | B1 | A2 | B2 | A3 | B3 | | | Исходные |
| 2 | Кол-во зерен: | 20000 | | 133,368 | 110,186 | 93,4798 | 79,4396 | 133,368 | 110,186 | | | 133,368 |
| 3 | Размеры зерен: | | | 156,926 | 134,025 | 84,8867 | 71,7426 | 156,926 | 134,025 | | | 156,926 |
| 4 | mm | 50 | | 187,594 | 160,736 | 85,8905 | 74,3169 | 187,594 | 160,736 | | | 187,594 |
| 5 | mm | 220 | | 93,4798 | 79,4396 | 107,645 | 89,8336 | 127,652 | 106,682 | | | 93,4798 |
| 6 | mm | 10 | | 127,652 | 106,682 | 87,7341 | 58,1697 | 126,149 | 105,658 | | | 127,652 |
| 7 | A/B mm | 1,15 | | 126,149 | 105,658 | 109,738 | 90,7839 | 152,66 | 128,723 | | | 126,149 |
| 8 | A/B mm | 1,22 | | 152,66 | 128,723 | 120,46 | 103,344 | 140,063 | 117,529 | | | 152,66 |
| 9 | Размер ячейки | 160 | | 84,8867 | 71,7426 | 79,1696 | 67,9467 | 126,656 | 106,967 | | | 84,8867 |
| 10 | Размер ячейки | 125 | | 140,063 | 117,529 | 119,19 | 102,776 | 167,116 | 140,032 | | | 140,063 |
| 11 | | | | 85,8905 | 74,3169 | 95,8649 | 80,2208 | 166,746 | 140,374 | | | 85,8905 |
| 12 | | | | 126,656 | 106,967 | 121,692 | 101,244 | 148,949 | 122,393 | | | 126,656 |
| 13 | Первое сито: | | | 107,546 | 89,8336 | 102,624 | 88,6353 | 143,491 | 122,716 | | | 107,546 |
| 14 | Прошло: | 19991 | 99,95% | 87,7341 | 68,1697 | 96,4213 | 80,1722 | 156,637 | 126,346 | | | 87,7341 |
| 15 | Осталось: | 9 | 0,05% | 167,116 | 140,032 | 103,279 | 86,8527 | 160,905 | 138,038 | | | 167,116 |
| 16 | | | | 109,738 | 90,7839 | 111,605 | 91,9584 | 185,846 | 157,608 | | | 109,738 |
| 17 | Второе сито: | | | 166,746 | 140,374 | 109,133 | 94,4724 | 143,174 | 121,725 | | | 166,746 |
| 18 | Прошло: | 7196 | 35,99% | 120,46 | 103,344 | 122,167 | 101,489 | 136,959 | 113,573 | | | 120,46 |
| 19 | Осталось: | 12796 | 64,01% | 148,949 | 122,393 | 111,404 | 96,4463 | 161,552 | 133,491 | | | 148,949 |
| 20 | | | | 79,1696 | 67,9467 | 105,003 | 90,2197 | 163,965 | 139,08 | | | 79,1696 |
| 21 | | | | 143,491 | 122,716 | 103,051 | 87,1758 | 131,653 | 113,652 | | | 143,491 |
| 22 | | | | 156,637 | 126,346 | 113 | 96,3444 | 129,495 | 110,159 | | | 156,637 |
| 23 | Расчет | | | 119,19 | 102,776 | 81,4771 | 69,1708 | 162,666 | 138,01 | | | 119,19 |
| 24 | | | | 160,905 | 138,038 | 116,269 | 101,241 | 148,94 | 124,616 | | | 160,905 |
| 25 | | | | 185,846 | 157,608 | 118,171 | 99,1788 | 133,183 | 113,771 | | | 185,846 |
| 26 | | | | 95,8649 | 80,2208 | 87,6448 | 74,2364 | 148,681 | 125,831 | | | 95,8649 |
| 27 | Комментарий: | | | 143,174 | 121,725 | 107,518 | 88,7293 | 130,729 | 112,631 | | | 143,174 |
| 28 | A1, B1 | Зерна, которые прошли 1 сито | | 121,692 | 101,244 | 71,3594 | 59,0179 | 149,36 | 129,598 | | | 121,692 |
| 29 | A2, B2 | Зерна, которые прошли 2 сито | | 136,959 | 113,573 | 110,269 | 90,6362 | 166,945 | 146,253 | | | 136,959 |
| 30 | A3, B3 | Зерна, которые остались на 2-м сите | | 161,552 | 133,491 | 124,462 | 102,762 | 172,697 | 143,559 | | | 161,552 |
| 31 | | | | 102,622 | 88,6353 | 111,89 | 91,9313 | 146,543 | 126,366 | | | 102,622 |
| 32 | Сумм. объем | 53076330780 | | 163,965 | 139,08 | 102,332 | 84,6444 | 147,378 | 123,105 | | | 163,965 |
| 33 | | | | 96,4213 | 80,1722 | 117,025 | 99,2988 | 132,573 | 111,831 | | | 96,4213 |
| 34 | Первое сито: | | | 131,853 | 113,652 | 115,111 | 96,1657 | 137,465 | 115,293 | | | 131,853 |
| 35 | Прошло: | 52971988896 | 99,80% | 129,495 | 110,159 | 113,664 | 96,0638 | 159,225 | 133,652 | | | 129,495 |
| 36 | Осталось: | 104341684 | 0,20% | 162,666 | 138,01 | 112,052 | 95,6183 | 162,474 | 136,751 | | | 162,666 |
| 37 | | | | 103,279 | 86,8527 | 119,25 | 98,2453 | 131,452 | 112,656 | | | 103,279 |
| 38 | Второе сито: | | | 148,94 | 124,616 | 117,618 | 97,6914 | 152,012 | 129,072 | | | 148,94 |
| 39 | Прошло: | 8535294013 | 16,11% | 133,183 | 113,771 | 108,693 | 93,0697 | 196,28 | 166,062 | | | 133,183 |
| 40 | Осталось: | 44436694863 | 83,89% | 148,681 | 125,831 | 116,457 | 99,8006 | 174,827 | 147,555 | | | 148,681 |

Рис. 4. Фрагмент результатов расчёта

Квадратные ячейки:

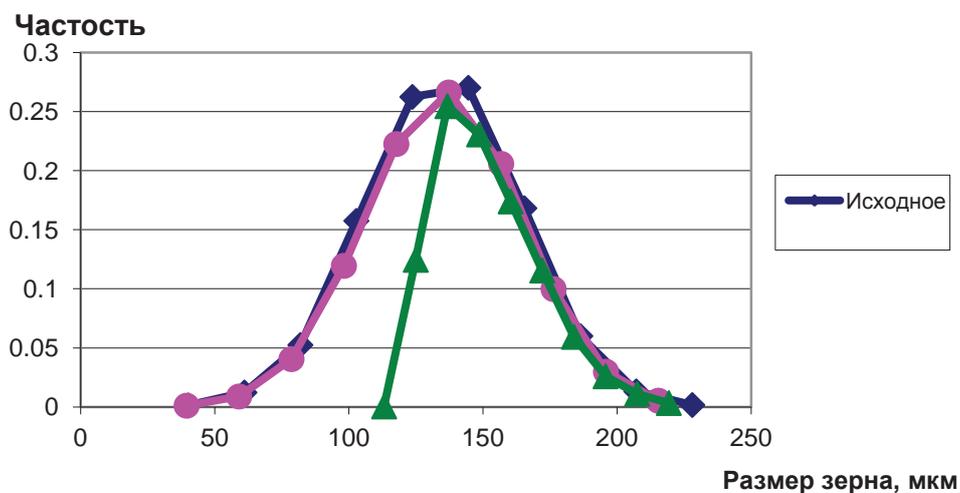


Рис. 5а. Результаты распределения размера А зёрен AC 160/125, полученных на основе моделирования через квадратные ячейки

Круглые ячейки:

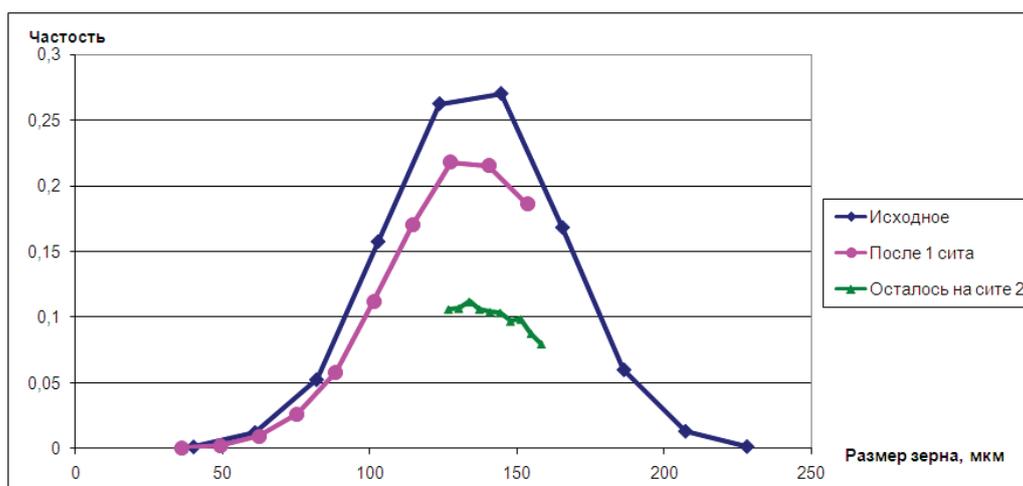


Рис. 5б. Результаты распределения размера А зёрен AC 160/125, полученных на основе моделирования через круглые ячейки

Как видно из сравнения рис. 2 и 5а поля рассеяния размеров реальных зёрен и полученных на основе математических моделей при использовании квадратных ячеек сит очень близки. Через квадратные сита прошло большое количество зерен с размерами, значительно превышающими стороны ячеек и первого и второго сита. При анализе результатов отсева зёрен через сита круглой формы (рис. 5б) картина совсем иная: поля рассеяния размеров зёрен, прошедших через верхнее и задержавшихся на нижнем значительно уменьшились и практически приблизились к размерам зерен основной фракции.

Выводы

По результатам исследований необходимо сделать следующие выводы: применение сит с ячейками круглой формы, у которых верхнее сито имеет диаметр равный размеру зерна (длине А) крупной фракции, а нижнее – размеру основной фракции, значительно уменьшает вероятность попадания зерен с размерами, превышающими данную зернистость по ГОСТу. Такой метод контроля позволяет повысить однородность параметрического состава зёрен и тем самым улучшить показатели их режущей способности и качества обрабатываемой поверхности.

Список литературы

1. Короткова Л.П., Прокаев Н.В. Качество поверхности наружных колец подшипников, обработанных шлифовальными кругами с контролируемой формой // Обработка металлов. – 2002. - №2 (35). – С. 19 – 22.
2. Аскалонова Т.А., Леонов С.Л. Имитационное стохастическое моделирование взаимодействия инструмента и заготовки при абразивной обработке. 2-я Международная научно-практическая конференция «Инновации в машиностроении», Кемерово: изд-во КузГТУ, 2011г., с. 83 – 87.

IMPROVING THE QUALITY CONTROL OF DIAMOND POWDERS

Askalonova T.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e – mail: ata42@mail.ru

Leonov S. L., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: sergey_and_nady@mail.ru

Lukin L.N. Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e – mail: sergey_and_nady@mail.ru

Polzunov Altai State Technical University, 46, Lenina avenue, Altai region, Barnaul, 656038, Russian Federation

Abstract

The article is focused on diamond grains linear parameters control based on statistical methods. The quality of treated surface, cutting force and temperature in the point of contact with the grain is determined by the uniformity of grain composition and magnitude of the scattering field. The article contains the measurements of a wide range of grains of diamond grains using the traditional method. Polygons of distribution of linear parameters are constructed. A significant excess of the grain fraction which go beyond the size of the indicated granularity is established. The author offers a brand new method to control the fraction using sieves with round cells. Simulation of grain sieving on the basis of stochastic modelling showed that the proposed control method significantly reduces the number of oversized grains. This is confirmed by the polygons of distribution. Almost all the generation of grains is within the specified grain size. The software is developed on the Excel framework using VBA.

Keywords: diamond grain, parametric composition, grain, control sieves, quality, polygon of distribution, generation, stochastic modelling.

УДК 614.841

ИССЛЕДОВАНИЕ МОНОТОННОСТИ ТРУДА В ПОТОЧНО – КОНВЕЙЕРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*ЖИТНАЯ С. В., старший преподаватель
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)*

Житная С.В. – 91034, г. Луганск, кв – л Молодежный, 20а,
Луганский национальный университет имени В. Даля,
е – mail: bgd.ot.dahl@yandex.ru

Аннотация

В данной статье проведено исследование особенностей преодоления монотонности труда, как фактора, негативно влияющего на процесс производства, и снижающего общую производительность, в особенности на предприятиях легкой промышленности на поточно-конвейерных линиях. разработаны рекомендации, направленные на уменьшение монотонности труда и особенности их внедрения в практику производства, такие как рациональная организация рабочего места, внедрение новых технологий и автоматизированных систем, чередование трудовых операций между работниками и другие.

Ключевые слова: монотонность труда, поточно – конвейерная линия, рациональные условия труда, монотония, психофизиология, стресс, нейрофизиологический конфликт, ЦНС, элементы риска, теплота, излучение, конвекция, шум, вибрация.

Введение

Изучение влияния условий труда началось в конце XIX в. и с тех пор является неотъемлемой частью трудового процесса. Еще К.Маркс и Ф.Энгельс изучали положение трудового класса в Англии и сделали выводы о зависимости эффективности труда от условий труда, бытовых условий работника, продолжительности рабочего дня и т.п. Рациональная организация рабочего места, выполнение правил эксплуатации станка, и соблюдение правил безопасности являются одними из важнейших условий высокопроизводительного труда и в наше время. К организации производства на рабочем месте предъявляются следующие основные требования: создание условий для высокопроизводительной работы; механизация и автоматизация технологического процесса, максимально устраняющая применение ручного труда; ритмичное снабжение рабочего места сырьем и материалами; повышение квалификации рабочего. Но немаловажную роль в повышении производительности труда играет и снижение монотонности выполняемой работы. Под монотонностью труда следует понимать однообразие трудовых операций или производственной обстановки. Основными отрицательными последствиями монотонного труда являются: снижение работоспособности и производительности труда; ухудшение функционального состояния организма работающего; повышенная заболеваемость; снижение творческой инициативы; производственный травматизм и т.д.

Наиболее выражена монотонность труда в поточно-конвейерном производстве, которое находит широкое применение в таких отраслях промышленности, как машиностроение, приборостроение, радиоэлектронная, легкая, пищевая и другие виды промышленности. Монотонность характеризует ряд таких профессий как станочник, штамповщик, прессовщик, оператор полуавтоматических линий, а также оператор различных пультов управления технологическими процессами. Поэтому проблема

исследования и преодоления монотонности труда, а именно при выполнении работ на поточно-конвейерных линиях является весьма важной и актуальной.

Описание теоретических или экспериментальных исследований

Значительный вклад в исследование проблемы монотонности труда и ее влияния при работе на поточно – конвейерных линиях внесли такие зарубежные и отечественные ученые: Е.Я. Юдина, С.В. Белова, А.Ф. Власов, Ю.Г. Козырева, А.А. Кудинова и другие [1 – 5].

Вместе с тем в легкой промышленности еще недостаточно исследована проблема монотонности труда. Это и обуславливает необходимость дальнейших научных разработок в данном направлении.

Основной целью данной статьи является исследование особенностей преодоления монотонности труда, как фактора, негативно влияющего на процесс производства, и снижающего общую производительность, в особенности на предприятиях легкой промышленности на поточно-конвейерных линиях. Разработать рекомендации, направленные на уменьшение монотонности труда и особенности их внедрения в практику производства.

За счет рациональной организации производства и труда можно удвоить объем промышленной продукции без дополнительных капиталовложений. Поэтому сейчас важное значение при разработке рациональных условий труда уделяют огромное внимание исследованию монотонности выполняемых заданий на рабочем месте, так как специалисты в этой области знают, что она существенно снижает физические и психологические возможности организма работника, что в свою очередь отрицательно влияет на продуктивность труда в целом. Особенно это характерно для тех предприятий, где используются станки с ЧПУ и роботизированные комплексы, совершенствуются поточно-конвейерные линии, что способствует снижению физической нагрузки, но провоцирует наличие монотонности. Монотонность труда вызывает у работников монотонию. Монотония – это функциональное состояние организма человека, определяемое комплексом психологических и физиологических изменений в организме, возникающее при монотонной работе, т.е. ответная реакция организма на монотонный труд. Монотонность сопровождается скукой, апатией к выполнению трудовой деятельности [6].

Влияние монотонного труда на организм работника весьма сложно и многообразно. Что касается психофизиологических реакций человека на такой труд, то он может вызвать стресс. Стресс – это нарушение психологического состояния в результате травмирующих обстоятельств, негативных условий труда или других аспектов деятельности человека. Зачастую производственный стресс ведет к алкоголизму, прогулам, воровству, текучесть кадров резко возрастает. Монотонность обстановки и действий вызывают однонаправленное снижение уровня показателей сердечно – сосудистой системы и высшей нервной деятельности. Установлено, что монотонный труд, вызывает прежде всего изменения в функциональном состоянии ЦНС, что проявляется в сложной зрительно-моторной реакции, замедлению способности к переключению внимания, снижению подвижности основных нервных процессов. При выполнении монотонной работы у работающих возникает своеобразный нейрофизиологический конфликт. С одной стороны, скучная однообразная работа, которая приводит к прогрессирующему снижению активности различных структур ЦНС. С другой стороны – работу необходимо выполнять без ущерба для количества и качества продукции. Все это усиливает нервное напряжение, обусловленное необходимостью волевого поддержания бодрствования и работоспособности на определенном уровне. Монотонная работа приводит к изменению и со стороны различных негативных функций. Во время такой работы снижается частота сердечных сокращений на 25 – 30 %, АД – на 5 – 10 %; увеличивается коэффициент вариации сердечного ритма. Монотонная работа, осложненная нервным напряжением, возникающим при высокой степени ответственности с элементами риска для собственной жизни (машинисты метрополитена, диспетчеры т операторы газокompрессорных и химических пультов управления и др.), или работа на конвейере в быстром темпе (2 – 6 с) приводит

к изменениям физиологических функций, глубина и выраженность которых тем больше, чем фактор монотонности в сочетании со сниженным уровнем двигательной активности вызывает ослабление защитных свойств организма, что проявляется в увеличении общей заболеваемости у лиц, занятых монотонным трудом по сравнению с другими профессиями, увеличивается частота невротических и психосоматических расстройств и нарастает с увеличением стажа работы с монотонным характером труда. При стаже работы с монотонным характером труда 10 – 15 лет и более число случаев нетрудоспособности по отдельным формам болезней увеличивается в 3 – 9,8 раза. Этот фактор монотонности также присутствует при работе на поточно-конвейерных линиях легкой промышленности. Кроме того, цеха характеризуются значительными выделениями теплоты, передаваемой излучением и конвекцией. В них преобладает повышенный шум и вибрация. Поэтому наряду с этими неблагоприятными рабочими условиями необходимо проводить меры и по борьбе с монотонностью труда в данном производстве [7, 8].

Результаты и обсуждение

Снижение монотонности труда является обязательным звеном в цепочке совершенствования процесса производства. А для уменьшения ее влияния на данный процесс можно применять следующие действия:

- расширение круга обязанностей, усложнение работы или обогащение ее такими функциями и обязанностями, которые способны сыграть роль стимулов для того или иного сотрудника;
- обращать внимание на уровень шума в помещении, где происходит основная работа, так как, если в помещении уровень шума превышает норму, то работнику трудно сосредоточиться на выполнении своих трудовых обязанностей, шум в помещении приводит к определенным психологическим последствиям, таким, как снижение или потеря слуха;
- оформление помещений в определенной цветовой гамме, цвет стен влияет на восприятие человека, сотрудника, на размер помещения;
- уделять особое внимание освещению, на однообразных трудовых процессах со значительным напряжением зрения положительный эффект дает периодическое повышение освещенности, это сбивает монотонность и способствует поддержанию нормального уровня трудоспособности;
- автоматизация однообразного ручного труда;
- оптимизация содержания труда, темпа и ритма работы;
- совмещение профессий и чередование операций, выполнение которых активизирует у исполнителей различные мышечные группы, нервные центры и физиологические системы организма. Систему чередования производственных операций, можно рассматривать как одну из наиболее перспективных форм совершенствования организации труда и снижения его монотонности.
- внедрение рациональных режимов труда и отдыха с введением 5 – минутных регламентированных перерывов через каждый час работы с целью снижения фактора монотонности;
- усиление мотивации через объяснение значимости деятельности работника;
- рациональная организация рабочего места;
- введение режимов комплексов производственной гимнастики, функциональной музыки и т.п.;
- поддержание необходимой температуры в рабочем помещении, температура воздуха при монотонной работе на должна превышать 17 – 19⁰С, т.е. быть несколько ниже гигиенической нормы (18 – 21⁰С).

Выводы

Если рассматривать именно поточно-конвейерное производство, то здесь возможно применение таких методов борьбы с монотонностью труда, как рациональная организация рабочего места,

внедрение новых технологий и автоматизированных систем, чередование трудовых операций между работниками, поддержание оптимального темпа и ритма работы, введение регламентированных перерывов. Применение этих рекомендаций на практике – еще один шаг на пути совершенствования производственной деятельности.

Список литературы

1. Охрана труда в машиностроении. Учебник для вузов. Под ред. Э.А. Юдина, М., 1983.
2. С.В. Белов Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (техносферная безопасность). Учебник для вузов. М.: ЮРАЙТ, 2011. – 680с.
3. Власов А.Ф. Удаление пыли и стружки от режущих инструментов. — М.: Машиностроение, 1982.
4. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы. Справочник. М.; Машиностроение, 1988.
5. Козырев Ю.Г. Применение промышленных роботов. М.; КНОРУС, 2010. – 475с.
6. Физиология человека: Учебник / Под ред. В.М.Смирнова. М., 2001.
7. Общий курс физиологии человека и животных. В 2 кн. Кн.1 Физиология нервн., мышечн. и сенсорн. систем: Учебник для биол. и мед. спец. ВУЗов / Под ред. А.Д.Ноздрачева – М., 1991.
8. Аверьянов В.С., Уткин Н.С., Кемли А.И. Исследование адаптации к монотонному труду. // Охрана труда При выполнении монотонной работы. – М., 1975.

STUDY THE MONOTONY OF LABOR IN THREAD – ASSEMBLY PRODUCTION IN ENTERPRISES OF LIGHT INDUSTRY

Zhytnaya S.V., M.Sc. (Engineering), Senior lecturer, e – mail: bgd.ot.dahl@yandex.ru

Luhansk national University named after V. Dahl, Molodegny, 20a, Lugansk, 91034, Luhansk people's Republic

Abstract

In this article the study of overcoming the monotony of labor, as a factor adversely affecting the production process, and reduce the overall performance, especially at the enterprises of light industry on the flow-conveyor lines. developed recommendations aimed at reducing the monotony of labor and the peculiarities of their introduction in practice of production, such as rational organization of the workplace, the introduction of new technologies and automated systems, the alternation of work between workers and others.

Keywords: the monotony of work, flow-conveyor line, rational working conditions, monotony, psychophysiology, stress, physiological conflict, CNS, risk elements, heat, radiation, convection, noise, vibration.

УДК 621.9.047

ПОДБОР АНИОННОГО СОСТАВА ЭЛЕКТРОЛИТА ДЛЯ ПРОШИВКИ МАЛЫХ ОТВЕРСТИЙ В МЕДИ

*РАХИМЯНОВ Х. М., доктор техн. наук, профессор,
ВАСИЛЕВСКАЯ С. И., ассистент,
ЖУРАВЛЕВА А. В., магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Рахимьянов Х.М. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: x.rakhimyanov@corp.nstu.ru; vasilevskaya@corp.nstu.ru

Аннотация

Рассмотрены вопросы выбора анионного состава электролитов при электрохимической размерной обработке (ЭХРО) отверстий малого диаметра в меди полым катодом – инструментом с соотношением внутреннего и наружного диаметров – 0,26 / 0,46 мм. Подтверждено, что при растворении меди в хлоридных растворах на поверхности обрабатываемого материала образуется труднорастворимое химическое соединение $CuCl$, препятствующее процессу формирования правильного профиля малого отверстия в начальный момент его прошивки. Показано, что в азотнокислых и серноокислых растворах при обработке меди анодное растворение осуществляется под торцем катода – инструмента. Выявлено, что с применением азотнокислых и серноокислых растворов при обработке меди, возможно прошивать отверстия малого диаметра при минимальном межэлектродном промежутке (МЭП) равном 0,05 мм, обеспечивая при этом не только повышение локализации процесса, но и высокую точность копирования формы катода – инструмента.

Ключевые слова: электрохимическая размерная обработка, межэлектродный промежуток, нейтральный электролит, прошивка отверстий малого диаметра, медь, нержавеющая сталь, катод – инструмент, струя электролита, анод, труднорастворимое химическое соединение $CuCl$.

Введение

Повышение эффективности формообразования при обработке деталей машин во многом определяется выбором рациональной технологической схемы, геометрии режущего инструмента, режимных параметров. Данная задача значительно усложняется при использовании электрофизических методов обработки, когда в формообразовании поверхностей задействованы не процессы разрушения обрабатываемого материала режущим клином, что является характерным для механической обработки, а иные физические воздействия – тепловые, химические, радиационные и др., а порой и их комбинации [1 – 4].

К таким обработкам относится и электрохимическая размерная обработка (ЭХРО) токопроводящих материалов, режимными параметрами которой помимо технологического напряжения являются характеристики рабочей среды – электролита (анионный и катионный состав, удельная электропроводность, выход обрабатываемого материала по току, кинематическая вязкость и др.), величина межэлектродного промежутка (МЭП), скорость гидродинамического потока в рабочей зоне. Правильное назначение режимных параметров и будет определять эффективность ЭХРО обрабатываемого материала по оценкам производительности процесса и точности формообразования поверхностей.

В работе [5] представлены результаты исследований по электрохимической прошивке отверстий малого диаметра (~0,5 мм) в меди. ЭХРО осуществлялась с использованием полого катода – инструмента с соотношением внутреннего и наружного диаметров – 0,26 / 0,46 мм. В качестве электролита был выбран 5 % водный раствор NaCl, обладающий высоким значением выхода меди по току, достаточной при низких концентрациях раствора электропроводностью. Давление струи на входе катода – инструмента составляло 0,3 МПа, значение которого обеспечивало в МЭП приемлемые для удаления продуктов анодного растворения гидродинамические потоки [6]. Электрохимическая прошивка отверстий малого диаметра предполагает возможность и перспективу обработки при меньших значениях МЭП по сравнению с традиционно исследуемыми в ЭХРО (0,1 – 0,5 мм) [7 – 10].

Электрохимическая обработка при уменьшении величины МЭП позволит повысить локализацию процесса анодного растворения, что, с одной стороны, приведет к увеличению плотности тока и, следовательно, скорости обработки, а с другой, улучшению точности копирования формы катода – инструмента. Однако, как показали результаты исследований [5], попытка ЭХРО на МЭП = 0,05 мм при давлении струи 0,3 МПа электролита 5 % NaCl и технологическом напряжении 10 В привела к полной пассивации поверхности меди не только под катодом, но и за его контуром. Это объясняется высокой интенсивностью образования в зоне обработки труднорастворимого химического соединения $CuCl$, удаление которого гидродинамическими потоками при давлении 0,3 МПа оказалось невозможным. Сбалансированность процессов образования данного химического соединения и его удаления гидродинамическими потоками при отмеченном давлении обеспечивалась при увеличении МЭП до 0,3 – 0,4 мм. Это привело к снижению локализации процесса анодного растворения и, соответственно, уменьшению производительности обработки и ухудшению точности формообразования. Однако, проведение ЭХРО при сохранении высокой степени локализации анодного растворения меди за счет малой величины МЭП возможно при выборе состава электролита, анионы которого исключают образование труднорастворимых химических соединений в зоне обработки.

Настоящая статья посвящена исследованию процесса электрохимической прошивки малых отверстий в меди в водных растворах $NaNO_3$ и Na_2SO_4 .

Описание экспериментальных исследований

Исследования по формообразованию отверстий малого диаметра проводились на экспериментальной установке, описанной в работе [5]. Обрабатываемым материалом являлась медь марки М1 ГОСТ 859 – 2001. Прошивка отверстий в указанном материале осуществлялась полым катодом – инструментом. В качестве его использовалась медицинская металлическая игла с соотношением наружного и внутреннего диаметров 0,26 мм / 0,46 мм [11]. Между анодом и полым катодом – инструментом устанавливался МЭЗ равный 0,05 мм. Для экспериментальных исследований были применены 5 % водные растворы нейтральных солей азотнокислого натрия ($NaNO_3$) ГОСТ 828 – 77, сернокислого натрия (Na_2SO_4) ГОСТ 4166 – 76. Подача электролита осуществлялась через отверстие катода – инструмента под давлением $P = 0,3$ МПа. В исследованиях использовался источник технологического тока с диапазоном рабочих напряжений от 5 В до 20 В. Прошивка отверстий проводилась при напряжении 10 В. Время прошивки отверстий варьировалось от 4 с до 20 с. Оценка результатов ЭХРО отверстий проводилась с помощью измерительного микроскопа Nikon MM – 400.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены результаты формообразования отверстий малого диаметра в меди при электрохимической прошивке их в 5 % водных растворах на основе нейтральных солей азотнокисло-

го и сернокислого натрия (NaNO_3 ; Na_2SO_4) с применением минимальной величины МЭП, равного 0,05 мм.

Анализ результатов электрохимического растворения меди в указанных электролитах (рис. 1 а, б) при МЭП = 0,05 мм после 10 с обработки показал иной характер, чем при обработке ее в хлоридных растворах после 20 с (рис. 2) [5].

Так при электрохимической прошивке отверстия в меди в электролитах NaNO_3 и Na_2SO_4 (рис. 1 а, б) его формообразование начинается под торцом катода – инструмента. Схематично начало процесса формообразования отверстия показано на рис. 3. Подобная кинетика процесса ЭХРО позволяет осуществить непрерывную стабилизацию МЭП на установленном уровне (0,05 мм), что обеспечивает высокую степень локализации электрохимической обработки.

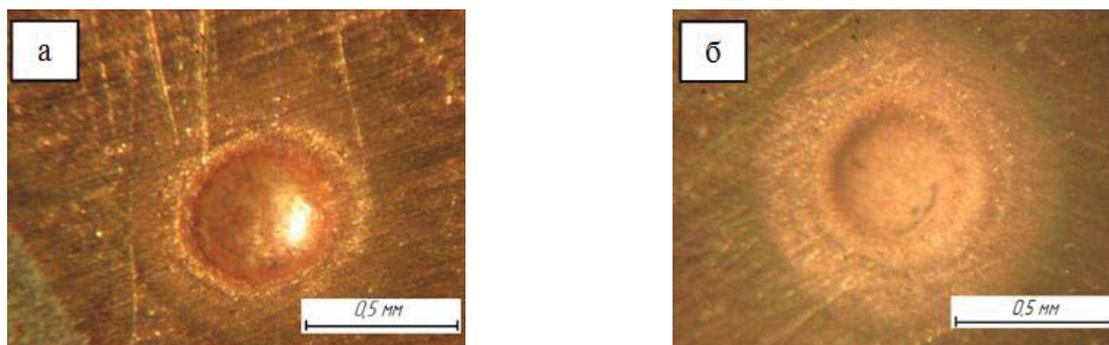


Рис. 1. Формирование отверстия в меди при электрохимической прошивке в нейтральных растворах после 10 с; $P = 0,3$ МПа; $\Delta = 0,05$ мм:
(а – азотнокислый натрий (NaNO_3); б – сернокислый натрий (Na_2SO_4))

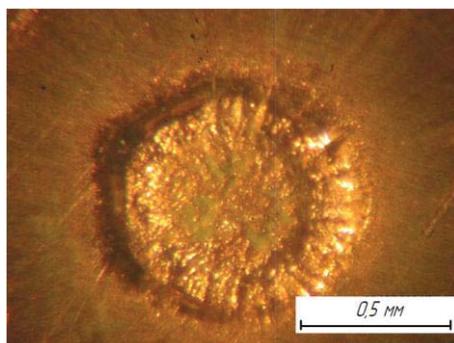


Рис. 2. Фото поверхности образца после 20 с электрохимической прошивки отверстия в меди в 5 % растворе хлористого натрия (NaCl):
 $P = 0,3$ МПа; $\Delta = 0,05$ мм [5]

Стабилизация МЭП = 0,05 мм нереальна при использовании хлоридного раствора, когда в рабочей зоне под торцом катода – инструмента в результате интенсивного анодного растворения образуется труднорастворимое химическое соединение (CuCl), удалить которое с помощью действующих гидродинамических потоков не возможно (рис. 2). Смена электролита с хлоридного на азотнокислый или сернокислый позволила сбалансировать процессы интенсивного (за счет малого МЭП) анодного растворения с образованием окислов меди и их эффективного удаления из зоны обработки даже при малых давлениях (0,3 МПа) электролита.

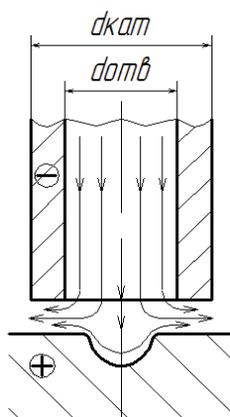


Рис. 3. Схема формирования отверстия в меди при электрохимической прошивке в нейтральных растворах NaNO_3 и Na_2SO_4 после 10 с

Для подтверждения того, что основной причиной при обработке меди в хлоридных растворах является образование на поверхности материала труднорастворимого химического соединения CuCl в работе проведено исследование процесса ЭХРО отверстий в нержавеющей стали 12Х18Н10 ГОСТ (5582 – 75). Электрохимическая прошивка отверстий в данном материале осуществлялась в 5 % водных растворах азотнокислого натрия (NaNO_3) и хлористого натрия (NaCl) на МЭП = 0,05 мм при давлении струи электролита 0,3 МПа и технологическом напряжении 10 В.

Результаты экспериментальных исследований по прошивке отверстий малого диаметра в нержавеющей стали при обработке в электролитах NaNO_3 и NaCl , показаны на рис. 4. Экспериментальные исследования электрохимического растворения нержавеющей стали в указанных электролитах (рис. 4 а, б) при МЭП = 0,05 мм после 4 с обработки показали, что механизм формообразования отверстий в данном материале, как в электролите NaNO_3 , так и в электролите NaCl осуществляется по схеме, представленной на рис. 3.

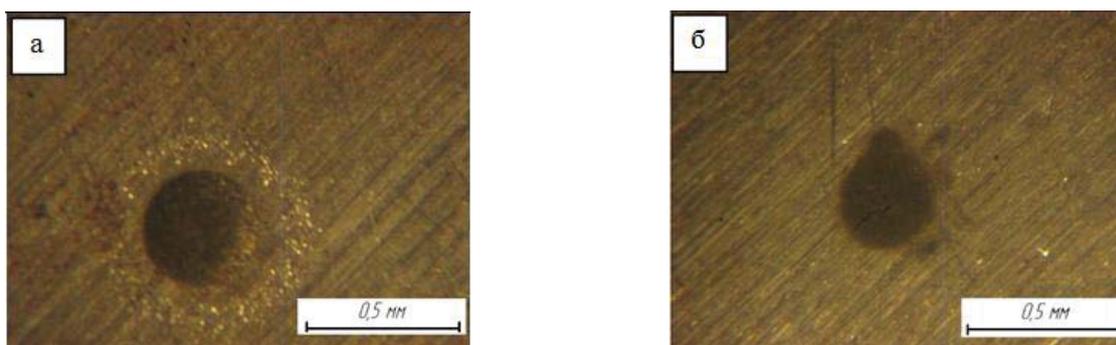


Рис. 4. Формирование отверстия в нержавеющей стали при электрохимической прошивке в нейтральных растворах после 4 с; $P = 0,3$ МПа; $\Delta = 0,05$ мм: (а – хлористый натрий (NaCl); б – азотнокислый натрий (NaNO_3))

Выводы

Установлено, что главным ограничением в процессе формообразования отверстий в меди при электрохимической прошивке в хлоридных растворах является возникновение пассивационных ограничений связанных с интенсивным образованием труднорастворимого химического соединения $CuCl$ на поверхности при малых значениях МЭП. В настоящей работе проведены экспериментальные исследования, связанные с обработкой меди в азотнокислом и сернокислом растворах. Показано, что механизм формирования в меди отверстий малого диаметра в указанных электролитах, осуществляется в зоне максимальной локализации процесса под активным торцом катода – инструмента. Отмечено, что при смене обрабатываемого материала с использованием не только азотнокислых и сернокислых растворов, но и хлоридных электролитов, механизм формирования отверстий малого диаметра происходит по аналогичной схеме. Выявлено, что при обработке малых отверстий в меди для обеспечения высокой степени процесса локализации за счет уменьшения МЭП до 0,05 мм необходимо применять электролиты исключающие образование труднорастворимого химического соединения $CuCl$ на поверхности материала. Полученные результаты подтверждают возможность ЭХРО отверстий малого диаметра в меди с непрерывным перемещением одного из электродов, установленных на МЭП равном 0,05 мм, что позволяет обеспечить максимально достаточную степень процесса локализации, высокую производительность обработки и точность копирования формы катода – инструмента.

Список литературы

1. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А. Точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов и пути ее повышения // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2009. - № 4. – С. 31 – 32.
2. Рахимьянов Х.М., Журавлев А.И., Гаар Н.П. Установка для исследования электрохимических процессов в условиях лазерной активации процесса электрохимической размерной обработки // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. – 2010. - № 2. С. 135 – 144.
3. Марусина В. И., Исакова Г. А., Рахимьянов Х. М. Фазовый и гранулометрический состав карбидов, образующихся при электроэрозионной обработке // *Порошковая металлургия*. – 1992. - № 10. – С. 61 – 64.
4. Иванцовский В.В., Рахимьянов Х.М. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин при интеграции поверхностной термической и финишной механической обработки // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2005. - № 6. – С. 43 – 46.
5. Рахимьянов Х.М., Василевская С.И. Особенности формообразования малых отверстий в меди при электрохимической обработке в водных хлоридных растворах // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2017. - № 2 (75). – С. 6 – 16. 10.17212/1994 – 6309 – 2017 – 2 – 6 – 16.
6. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Захаров А.С., Василевская С.И. Влияние гидродинамического режима на скорость анодного растворения меди в пассивирующих электролитах // *Механики XXI века*. – 2015. – № 14. – С. 112 – 115.
7. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. – М.: Машиностроение. – 1976. – 346 с.
8. Байсупов И.А. Электрохимическая обработка металлов. – М.: Высш. школа, 1981. – 152 с.
9. Черепанов Ю.П., Самецкий Б.И. Электрохимическая обработка в машиностроении. – М.: «Машиностроение», 1972. – 117 с.
10. Артамонов Б.А., Бишницкий А.Л., Волков Ю.С., Глазков А.В. Размерная электрическая обработка металлов. – М.: Высш. школа, 1978. – 336 с.

11. Рахимьянов Х.М., Василевская С.И. Технологические возможности электрохимической обработки отверстий неподвижным катодом – инструментом // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. - № 2. – С. 12 – 20. – doi:10.17212/1994 – 6309 – 2016 – 2 – 12 – 20.

THE CHOICE OF THE ANIONIC COMPOSITION OF ELECTROLYTE FOR FIRMWARE OF SMALL HOLES IN COPPER

Rakhimyanov Kh.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: x.raximyanov@corp.nstu.ru

Vasilevskaya S.I., Assistant, e – mail: vasilevskaya@corp.nstu.ru

Zhuravleva A.V., Master student, e – mail: a.zhuravleva.2011@stud.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The problems of the choice of the anionic composition of electrolytes during electrochemical dimensional processing of small holes in copper with a hollow cathode – tool with an internal diameter 0.26 mm and external diameter 0.46 mm are considered. It is confirmed that when dissolving copper in chloride solutions on the surface of the processed material, a hardly soluble chemical compound $CuCl$ forms, which prevent the process of forming the accurate profile of the small hole at the initial moment of its penetrating. It is shown that in the nitric acid and sulphate solutions during copper treatment anodic dissolution is carried out under the end face of the cathode-tool. It has been found that with the use of nitric acid and sulphate solutions in the treatment of copper, it is possible to penetrate small holes with a minimum interelectrode gap of 0.05 mm, thus ensuring not only an increase in the localization of the process, but also high accuracy of copying the shape of the cathode – tool.

Keywords: Electrochemical dimensional processing, interelectrode gap, neutral electrolyte, small hole firmware, copper, stainless steel, cathode – tool, electrolyte jet, anode, hardly soluble chemical compound $CuCl$.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖУЩИХ СВОЙСТВ АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ

*ЯНЮШКИН А. С., доктор техн. наук, профессор,
ПОПОВ В. Ю., канд. техн. наук, доцент
(БрГУ, г. Братск, Россия)*

Янюшкин А.С. – 665709, г. Братск, ул.Макаренко, 40,
Братский государственный университет,
е – mail: yanyushkin@brstu.ru; berkutoff@rambler.ru

Аннотация

Анализ поверхности образца алмазного шлифовального круга после обработки нанопроченного материала позволил установить очаги образования засаленного слоя. Очевидно, что первыми очагами обработки являются именно алмазные зерна, через которые происходит контакт с обрабатываемой поверхностью. Поэтому алмазное шлифование высокопрочных и наноструктурных материалов традиционными методами вызывает определенные трудности. Это связано с потерей режущих свойств инструмента в виду интенсивного засаливания алмазоносного слоя уже в первые минуты обработки, что сказывается на неудовлетворительном качестве изделия. Анализ образцов показывает значительное число дефектов и трещин, а дефекты такого характера в значительной степени влияют на эксплуатационные свойства изделий.

Ключевые слова: комбинированная электроалмазная обработка, алмазное зерно, налип, засаливание, алмазный шлифовальный круг, качество поверхности.

Введение

Соблюдение точности размеров, сохранение геометрической формы, сохранение прочностных свойств, обеспечение необходимой шероховатости обрабатываемых деталей – это только часть из основных задач, решение которых стоит перед машиностроителями в сфере металлообработки [1, 2]. Для обработки современных материалов и сплавов широкое применение нашли круги на металлических связках. Однако существенной проблемой эксплуатации таких кругов является быстрая потеря их работоспособности вследствие того, что режущие зерна на поверхности круга покрываются засаленным слоем. Образовавшийся засаленный слой скрывает работоспособные зерна, а отработанным зернам не дает удаляться с поверхности круга [3 – 8]. Однако разные методы шлифования оказывают разное влияние на качество обработанной поверхности. Поэтому целью проведенных исследований является анализ этих методов как с точки зрения прикладной, так и фундаментальной науки о режущих свойствах алмазного инструмента на металлической связке.

Экспериментальные исследования поверхности алмазного круга

На начальном этапе исследований проведены химический и спектральный анализ состава связки шлифовального круга до обработки нанопроченного материала, легированного карбидом вольфрама. Результаты растровой электронной микроскопии со спектральным химическим анализом приведены на рис. 1.

Дополнительно проведенный рентгеноструктурный анализ этой же поверхности свидетельствует о наличии фазы меди и олова в виде твердых растворов $\text{Cu}_{0.932}\text{Sn}_{0.068}$ и $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{14}$, что полностью соответствует составу металлической связки М2 – 01.

Анализ образца алмазного круга после шлифования нанопропрочненного материала, позволил установить очаги образования засаленного слоя на поверхности круга. Для определения изменений проведен спектральный химический и рентгеноструктурный анализ поверхности круга. Химический анализ участка поверхности алмазного круга (рис. 2) позволил установить, что засаленный слой формируется из вольфрама, который сосредоточен вокруг алмазного зерна. Это позволяет сделать вывод, что первыми очагами обработки являются алмазные зерна [9, 10], через которые происходит контакт с обрабатываемой поверхностью.

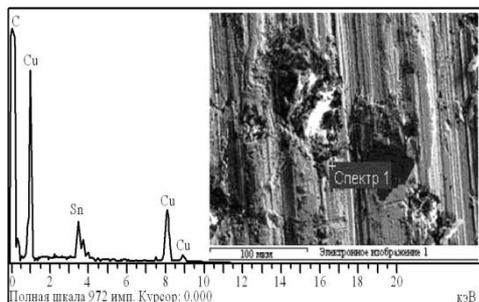


Рис. 1. Спектральный анализ поверхности алмазного круга до начала обработки

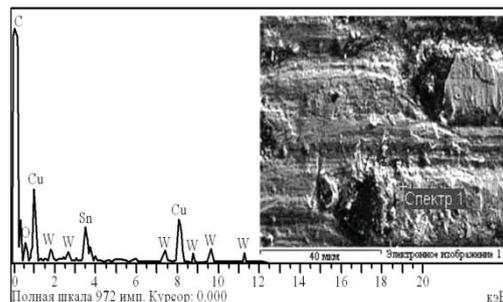


Рис. 2. Спектральный анализ алмазного круга после первых минут шлифования

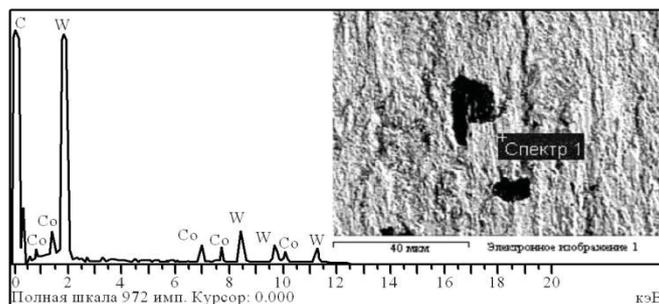


Рис. 3. Спектральный анализ алмазного круга после традиционного шлифования

Рентгеноструктурный анализ поверхности круга показал наличие засаленного слоя, состоящего из фаз карбида вольфрама WC. Следует отметить, что поверхность частично покрыта засаленным слоем, так как на рентгенограмме отмечено наличие элементов связи в виде твердых растворов меди и олова $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$, $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$, $\text{Cu}_{5.6}\text{Sn}$, $\text{Cu}_{0.932}\text{Sn}_{0.068}$.

Алмазный круг уже в первые минуты традиционного шлифования нанопропрочненного материала полностью теряет свои режущие свойства, поверхность покрывает засаленный слой. Химический анализ такого образца показал, что на поверхности образуется засаленный слой, строение которого определяется составом обрабатываемого материала (рис. 3).

Рентгеноструктурный анализ позволил установить, что засаленный слой почти полностью скрывает поверхность алмазного круга и состоит из фаз карбида вольфрама WC и фазы вновь образовавшегося сложного карбида вольфрама $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, что может свидетельствовать о деструкции карбида вольфрама в поверхностном слое сплава.

При анализе образцов после алмазного шлифования с непрерывной электрохимической правкой установлено наличие на поверхности круга компонентов обрабатываемого материала, что может свидетельствовать о частичном засаливании алмазного круга.

Спектральный химический анализ образца (рис. 4) показал следующий химический состав исследуемой поверхности: 80,6 % алмаз и углерод, 5,65 % медь и олово и 10,41 % вольфрам. Остальное – наполнители.

Это свидетельствует о значительном уменьшении засаленного слоя на поверхности алмазного круга. В результате неравномерного электрохимического растворения связки наблюдаются небольшие площадки засаливания, но в целом поверхность круга остается развитой. Постоянная правка круга позволяет снизить интенсивность образования засаленного слоя и обеспечить своевременное обновление поверхности круга.

Химический анализ образцов поверхности алмазного круга после комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной непрерывной правкой круга, позволил установить наличие только элементов связки и углерода, что указывает на отсутствие засаленного слоя (рис. 5).

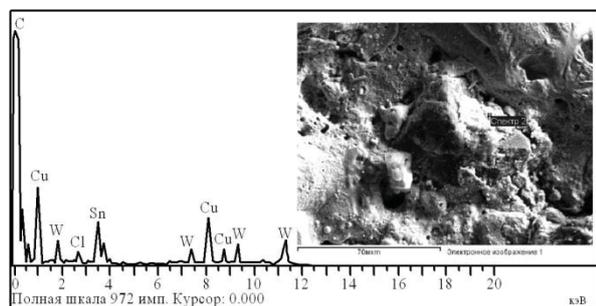


Рис. 4. Спектральный анализ поверхности круга после шлифования с электрохимической правкой

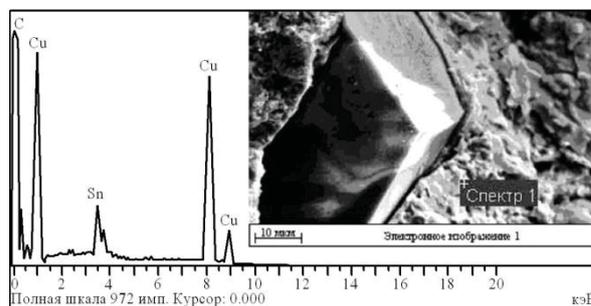


Рис. 5. Спектральный анализ поверхности круга после комбинированного электроалмазного шлифования

Рентгеноструктурным анализом такой поверхности, также установлены только фазы элементов связки в виде твердых растворов олова и меди $Cu_{0,932}Sn_{0,068}$ и углерода C (алмаза) (рис. 6).

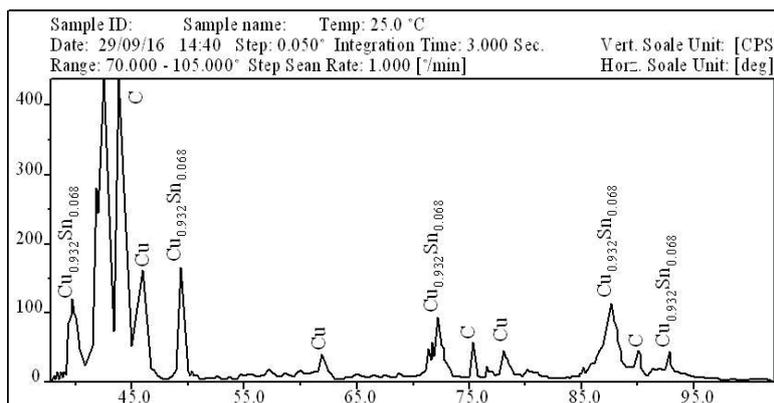


Рис. 6. Рентгенограмма образца алмазного круга после комбинированного электроалмазного шлифования

Экспериментальные исследования обработанной поверхности

На следующем этапе исследований оценивалось качество поверхности высокопрочных и наноструктурных материалов после алмазной абразивной обработки кругами на металлической связке в различных условиях.

Традиционный метод алмазного шлифования характеризуется высокими температурами в зоне резания [11, 12] и силовыми нагрузками со стороны абразивного инструмента, что негативно отражается на качестве обработанной поверхности. Результаты пластических деформаций, слабо прослеживаются при небольших увеличениях (рис. 7, а). Анализ образцов при большем увеличении обработанной поверхности показал значительное число дефектов и трещин (рис. 7, б), которые образуются вследствие снижения режущей способности круга за счет засаливания. Дефекты такого характера в значительной степени влияют на эксплуатационные свойства изделий из высокопрочных материалов.

Алмазное шлифование с непрерывной электрохимической правкой позволяет повысить режущие свойства шлифовального круга за счет препятствия образованию засаленного слоя и избежать образования подобных дефектов (рис. 7, в). Однако, в этом случае, наблюдается повышенная шероховатость, поскольку увеличивается количество зерен одновременно участвующих в процессе резания и влияющих на образование микронеровностей на обработанной поверхности. Поэтому данный метод может быть рекомендован для максимального удаления припуска на этапах предварительной обработки, где не требуется обеспечение высокого качества поверхности.

В результате исследования комбинированного метода шлифования, сочетающего электрохимическое разупрочнение обрабатываемой поверхности с одновременной непрерывной электрохимической правкой алмазного круга на металлической связке, установлено, что обработанная поверхность при этом не имеет ярко выраженных дефектов. Незначительные дефекты наблюдаются лишь по краям детали, где отсутствует жесткое базирование и характерно неравномерное электрохимическое растворение (рис. 7, г). При этом методе качество обработки выше, поскольку круг, обладая высокой режущей способностью, удаляет разупрочненный припуск со значительно меньшими усилиями.

Результаты и обсуждение

Алмазное шлифование высокопрочных и наноструктурных материалов традиционными методами вызывает определенные трудности, связанные с потерей режущих свойств инструмента в виду интенсивного засаливания алмазоносного слоя уже в первые минуты обработки, что сказывается на неудовлетворительном качестве изделия.

Первыми очагами засаливания являются участки вокруг алмазных зерен [9, 10]. Засаленный слой, образующийся при резании, состоит из продуктов обработки и при отсутствии правки со временем полностью скрывает рабочую поверхность круга [13 – 17]. Метод алмазного шлифования с непрерывной электрохимической правкой круга позволяет повысить режущие свойства абразивного инструмента за счет препятствия образованию засаленного слоя и обеспечить удовлетворительное качество обработанной поверхности. Данный метод может быть рекомендован для интенсивного удаления припуска на операциях предварительной обработки, где не требуется обеспечение высокого качества [18 – 21]. Комбинированное электроалмазное шлифование, сочетающее одновременную непрерывную правку круга и электрохимическое разупрочнение обрабатываемой поверхности, позволяет обеспечить стабильные режущие свойства алмазного инструмента и высокие показатели качества готового изделия. Данный метод может быть рекомендован на заключительных операциях обработки изделий из высокопрочных и наноструктурных материалов [22 – 25]. Для практической реализации технологии нами разработаны рекомендации по модернизации оборудования [26] и оснастки [27, 28]. А объединить знания и наглядно показать, визуализировать все особенности режущих

свойств алмазного инструмента на металлической связке представляется возможным при помощи компьютерного моделирования [29 – 33].

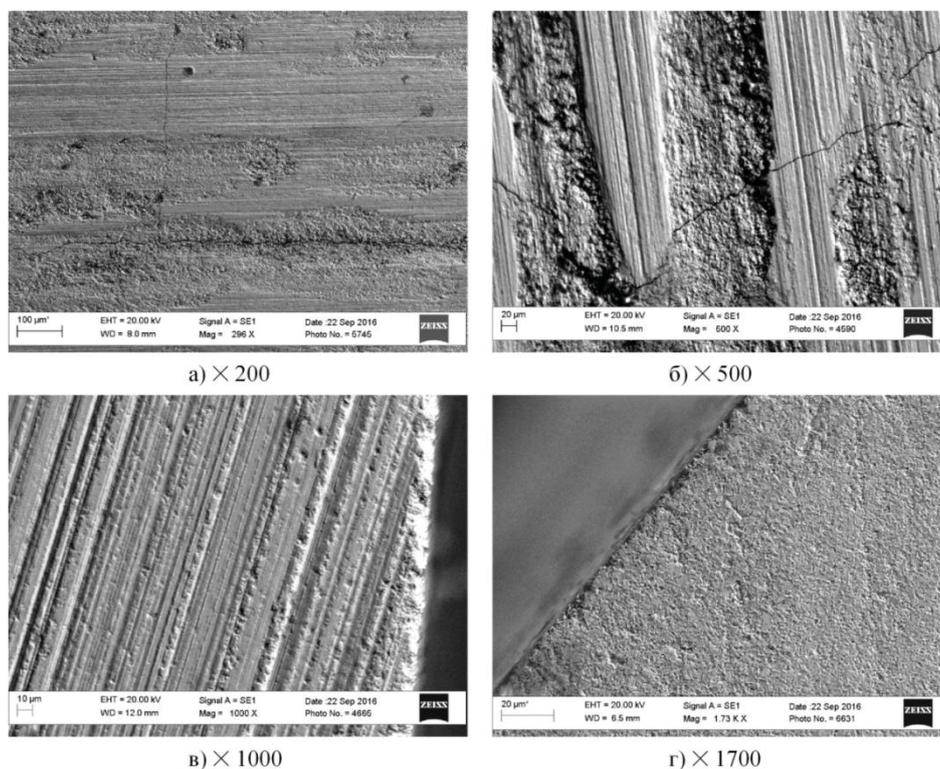


Рис. 7. Обработанная поверхность образцов высокопрочных материалов после различных видов алмазного шлифования: а, б – традиционное алмазное шлифование; в – алмазное шлифование с электрохимической правкой круга; г – комбинированное электроалмазное шлифование

Выводы

Использование предлагаемой технологии позволяет значительно увеличить работоспособность и область использования алмазного абразивного инструмента на металлической связке, а также повысить эффективность обработки высокопрочных и наноструктурных материалов.

Список литературы

1. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. "Ключевая" популярность электроалмазной обработки // Механики XXI века. 2016. № 15. С. 50 – 57.
2. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. Combined electro-diamond grinding of high speed steels // International Journal of Advances in Machining and Forming Operations. 2012. Т. 4. № 1. С. 91 – 102.
3. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Андронов А.Ю. Результаты комплексного изучения состава засаленного слоя алмазных кругов // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1 (21). С. 114 – 120.
4. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. Исследование поверхности алмазных кругов после комбинированной электроалмазной обработки быстрорежущей стали // Технология машиностроения. 2013. № 11. С. 26 – 30.

5. Попов В.Ю., Большаков И.М., Гуглин Г.С., Распутин Е.В. Исследование процесса засаливания алмазных шлифовальных кругов на металлической связке при обработке быстрорежущей стали Р6М5 // Механика XXI века. 2010. № 9. С. 101 – 104.
6. Кудряшов С.М., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Использование минеральных рассолов для устранения засаленного слоя при комбинированной электроалмазной обработке быстрорежущей стали Р6М5 // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 6. С. 109 – 118.
7. Янюшкин А.С., Медведева О.И., Архипов П.В., Попов В.Ю. Механизм образования защитных пленок на поверхности алмазных кругов с металлической связкой // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 1 (5). С. 132 – 138.
8. Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Поверхность алмазного круга после электроалмазного шлифования быстрорежущей стали // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2002. Т. 2. С. 146 – 151.
9. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Дефекты в алмазах – основа адгезии при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 1 (74). С. 30 – 39.
10. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. О разрушении алмазных зерен при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 4 (73). С. 16 – 23.
11. Ivancivsky V., Parts K., Popov V. Depth distribution of temperature in steel parts during surface hardening by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 788. С. 129 – 135.
12. Янюшкин А.С., Лосев А.Б., Якимов С.А., Попов В.Ю. Роль температуры при заточивании инструментов алмазными кругами на металлической связке // Металлургия и машиностроение: ежеквартальный специализированный информационный бюллетень. 2006. № 1. С. 49 – 53.
13. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Zamashchikov Y.I. Diffusion phenomena in the combined electric diamond grinding // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 799–800. С. 291 – 298.
14. Popov V.Y., Yanyushkin A.S. Adhesion-diffusion interaction of contact surfaces with the treatment diamond grinding wheels // Eastern European Scientific Journal. 2014. № 2. С. 301 – 310.
15. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Медведева О.И., Скиба В.Ю. Контактные процессы при алмазной обработке инструментальных материалов // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 3 (23). С. 68 – 74.
16. Медведева О.И., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Расчет энергии адгезии контактных поверхностей при шлифовании инструментальных материалов различными методами // Научные технологии в машиностроении. 2014. № 5 (35). С. 14 – 19.
17. Янюшкин А.С., Медведева О.И., Янюшкин С.А., Попов В.Ю. Физико-химическое взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов при комбинированном электрохимическом шлифовании // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 183 – 190.
18. Попов В.Ю. Шероховатость поверхности быстрорежущего инструмента в зависимости от режимов электроалмазной обработки // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 21–26.
19. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. Формирование поверхностного слоя режущего инструмента при алмазной обработке кругами на металлической связке // Решетневские чтения. 2014. Т. 1. № 18. С. 306 – 308.
20. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Сурьев А.А. Качество инструмента из инструментальных сталей после обработки методом двойного травления // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2003. Т. 2. С. 206 – 212.
21. Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Шероховатость поверхности после шлифования по методу двойного травления // Объединенный научный журнал. 2002. № 21. С. 65 – 67.
22. Медведева О.И., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Влияние параметров электроалмазного шлифования твердых сплавов на величину растворенного слоя // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 3 (64). С. 68 – 75.

23. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Медведева О.И., Ковалевский С.В., Рычков Д.А. Электроалмазная обработка высокопрочных материалов с нанесением защитных покрытий // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 3 (19). С. 125 – 129.
24. Архипов П.В., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Скиба В.Ю. Режущие свойства алмазного инструмента на металлической связке при шлифовании высокопрочных материалов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. № 6 (320). С. 61 – 69.
25. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Петров Н.П., Рычков Д.А. Повышение эффективности обработки высокопрочных композиционных материалов // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 146 – 149.
26. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Янюшкин Р.А. Элементы модернизации станков шлифовальной группы под процессы электроалмазной обработки // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2000. Т. 1. С. 189 – 190.
27. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Янпольский В.В. Тензометрическая вставка для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: пат. 2210749. Рос. Федерация; заявл. 13.06.01; № заявки 2001116429, опубл. 20.08.2003.
28. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Янпольский В.В. Приспособление для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: пат. 22115641. Рос. Федерация; заявл. 13.06.01; № заявки 2001116428, опубл. 10.11.2003.
29. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Атомная визуализация алмазного резания // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 1. С. 137 – 149.
30. Попов В.Ю., Ларева А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Моделирование процесса комбинированной электроалмазной обработки в среде Blender 3D // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2015. Т. 1. С. 187 – 191.
31. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Молекулярно-динамическое моделирование ювенильных поверхностей // Механики XXI века. 2015. № 14. С. 103 – 107.
32. Попов В.Ю., Шкуратова А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В., Мирошниченко Н.А. 3D моделирование процесса комбинированной электроалмазной обработки // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 201 – 207.
33. Попов В.Ю., Шкуратова А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В., Мирошниченко Н.А. Методика компьютерного моделирования процессов комбинированной электроалмазной обработки // Механики XXI века. 2014. № 13. С. 91 – 96.

RESEARCH OF CUTTING PROPERTIES OF DIAMOND TOOL ON METAL BOND

Yanyushkin A.S., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: yanyushkin@brstu.ru

Popov V.Y., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e – mail: berkutoff@rambler.ru

Bratsk State University, 40 Makarenko, Bratsk, 665709, Russian Federation

Abstract

The questions of the practical application of the combined electric diamond grinding are examined in the article. It is known, that one of the causes of grinding degradation is a continuous loading of active grits (abrasive grinding tool) by workpiece chips. It all affects the diamond grinding wheels efficiency and grinding ability with a result in increase of tool pressure, contact temperature and wheels specific removal rate. Science has partially identified some various methods to minimize grinding wheel loading, however, as to loading of metal-bond diamond grinding wheels the search is still in progress. Therefore, research people have to state, that in spite of the fact that the wheels made of cubic boron nitride are of little use as applied to ceramic, ultrahard, hard-alloyed hard-to-machine and nano – materials of the time, but manufactures have to apply cubic boron nitride wheels wherein diamond ones preferable.

Keywords: combined electric diamond grinding, synthetic diamond, adhesive-diffusion blockage, loading, diamond wheels, metal bonds.

УДК 621.9

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ИНДУКТОРА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ
В ПРОЦЕССЕ МАГНИТНО – АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

¹ЛЕОНОВ С. Л., доктор техн. наук, профессор,
¹ИКОННИКОВ А. М., канд. техн. наук, доцент,
²АДАМ КУЛАВНИК, профессор,
¹ГРЕБЕНЬКОВ Р. В., аспирант
(АлтГТУ, г. Барнаул, Россия)

Леонов С.Л. - 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
¹Алтайский государственный технический университет,
Адам Кулавик – 42 – 201, г. Ченстохова, ул. Домбровского 73,
²Ченхостовский технологический университет,
е – mail: sergey_and_nady@mail.ru

Аннотация

Авторами представлены особенности применения метода конечных элементов при моделировании магнитного поля индуктора на постоянных магнитах в процессе магнитно-абразивной обработки. Метод конечных элементов реализован в среде Ansys. В данном исследовании было произведено два способа расчета магнитной индукции. Первый заключается в полностью заполненном рабочем зазоре. Второй способ расчета заключается в замене ферромагнитного порошка цельным изотропным телом. Существенная погрешность при расчете двумя методами отсутствует. В итоге получаем практически мгновенный расчет магнитной индукции без потери точности полученных результатов.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, постоянный магнит, магнитное поле, магнитная индукция, метод конечных элементов.

Введение

Состояние поверхностного слоя деталей машин и режущих инструментов в значительной мере определяют их эксплуатационные свойства. Для изделий и инструментов, к которым предъявляются требования долговечности и надежности, важны такие характеристики поверхности, как износостойкость, коррозионная стойкость, стабильность качества поверхности. Окончательные свойства поверхности определяются в процессе ее изготовления и особенно на финишных операциях.

К финишным операциям относится и магнитно-абразивная обработка (МАО) [1]. При МАО роль режущего инструмента выполняет порция ферромагнитного порошка, а заготовку для обработки размещают между полюсами магнитного индуктора на определенном расстоянии. Пространство между полюсами индуктора частично или полностью заполняют магнитно-абразивным порошком. Под воздействием магнитного поля частицы ферромагнитного порошка формируются в цепочки, образуя своеобразную «щетку». Данная щетка удерживается силами магнитного поля в рабочем пространстве, оказывается прижатой к обрабатываемой поверхности и при движении заготовки относительно индуктора осуществляет сьем с поверхности обрабатываемой детали. При этом удаляется припуск и

формируется поверхность с новым микрорельефом и измененными физико – механическими свойствами поверхностного слоя. Поэтому, зная распределение сил магнитного поля в рабочей зоне во время работы, возможно смоделировать распределение ферромагнитного порошка по рабочей поверхности магнитного индуктора [2].

Описание теоретических исследований

В настоящее время магнитные задачи для магнитотехнических устройств со сложной геометрией как внешних, так и внутренних границ, наличием достаточного количества подобластей модели устройства с различными магнитными и проводящими свойствами решаются численными, как правило, проекционно-сеточными методами, к которым относится и метод конечных элементов [3]. Метод конечных элементов (МКЭ), по крайней мере его основы, известен уже более полувека, но настоящий взлет он получил лишь с развитием современных средств информатики. К основным преимуществам МКЭ относят доступность и простоту его понимания, применимость метода для задач с произвольной формой области решения, возможность создания на основе метода высококачественных универсальных программ для ЭВМ. Строгое доказательство таких важных свойств, как устойчивость, сходимости и точность метода, приводится в соответствующих разделах математики и часто представляет непростую проблему. Тем не менее МКЭ активно развивается, с его помощью без строгого математического обоснования используемых приемов успешно решаются сложные технические проблемы. Правильность же работы созданных алгоритмов, реализующих МКЭ, проверяют на известных точных решениях. Суть проекционных методов, к которым и относится МКЭ, состоит в попытке аппроксимировать решение дифференциального уравнения конечной линейной комбинацией базисных (пробных) функций (функций формы), т.е. в том, чтобы найти «проекцию» или приближенное решение в конечномерном пространстве для непрерывного решения в бесконечномерном функциональном пространстве. Форма базисной функции и критерий вычисления коэффициентов линейной комбинации определяют проекционный метод.

Дискретная модель непрерывной области строится следующим образом.

1. В области моделирования фиксируется конечное число точек. Эти точки называются узлами расчетной сети, которой покрывается область моделирования.
2. Значение непрерывной величины в каждой узловой точке считается переменной, которая и определяется.
3. Область моделирования непрерывной величины разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами. Эти элементы имеют общие узлы, аппроксимируют форму области и представляют собой расчетную или триангуляционную сеть.
4. Непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе полиномом, который определяется с помощью узловых значений этой величины. Для каждого элемента определяется свой полином. Они подбираются таким образом, чтобы вдоль границ элемента величина была непрерывна.

Метод конечных элементов основан на аппроксимации непрерывной функции (в нашем случае параметры магнитного поля) дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, которые называются конечными элементами. В качестве функции элемента чаще всего используется полином. Классификацию конечных элементов можно провести в соответствии с порядком этих полиномов.

За счет использования современных достижений вычислительной техники и математического моделирования появилась возможность рассчитывать магнитные поля численными методами. Большинство способов расчетов относится к случаю работы постоянного магнита на основной кривой размагничивания, где может быть достигнута наибольшая степень использования материала. При этом считается, что магнит намагничен до технического насыщения материала. Большое практическое значение при расчете имеет точность, даваемая им, и его трудоемкость. Высокая эффективность

конечно-элементных моделей, возможность на начальной стадии разработки заменить испытания опытных образцов численным экспериментом на компьютере обусловили появление мощных профессиональных программ (Ansys, Comsol, Elcut), реализующих МКЭ и позволяющих рассчитывать сложные электромагнитные и электромеханические процессы в электрических машинах при минимальных допущениях.

Таким образом, появляется возможность применения вышеперечисленного для моделирования магнитного поля, создаваемого магнитным индуктором на постоянных магнитах в процессе магнитно-абразивной обработки.

Магнитная система индуктора с постоянными магнитами представляет собой один, реже – два, расположенных друг над другом блока, составленных из отдельных магнитных ячеек [4]. Каждый блок составляют из поочередно расположенных магнитов (SmCo_5) и стальных магнитопроводов, причем магниты устанавливают так, что их одинаковые полюсы в каждой двух соседних ячейках обращены друг к другу (рис. 1). Размеры магнитов и магнитопроводов составляют 5x40 мм, величина рабочего зазора 1 мм [5], а размеры заготовки 105x19 мм. Данная система спроектирована в среде Ansys, в которой и будут проведены и представлены дальнейшие расчеты.

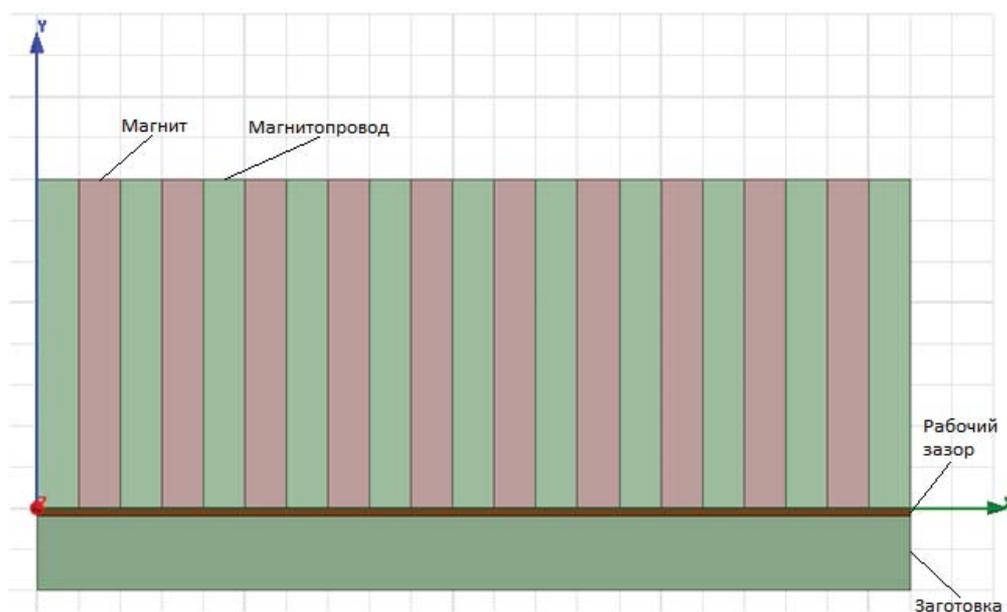


Рис. 1. Магнитная система индуктора на постоянных магнитах

В данном исследовании было произведено два способа расчета магнитной индукции.

Первый заключается в вычерчивании частиц порошка, полностью заполняющих рабочий зазор между рабочей поверхностью магнитного индуктора и обрабатываемой заготовки. Фрагмент магнитной системы индуктора на постоянных магнитах с заполненным рабочим зазором частицами ферромагнитного порошка [6] показан на рис. 2.

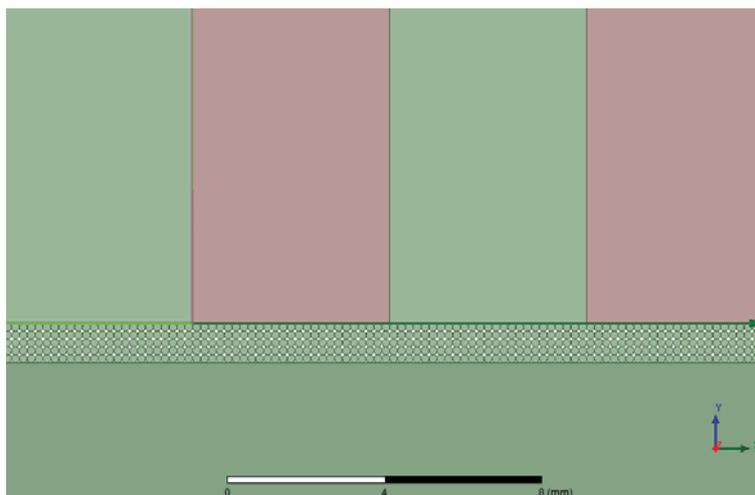


Рис. 2. Фрагмент магнитной системы индуктора на постоянных магнитах с заполненным рабочим зазором частицами ферромагнитного порошка

Второй способ расчета магнитной индукции заключается в замене частиц ферромагнитного порошка в рабочем зазоре цельным изотропным телом, которое полностью соответствует форме и величине рабочего зазора. Магнитные свойства изотропного тела полностью соответствуют магнитным свойствам ферромагнитного порошка в насыпном виде. Фрагмент магнитной системы индуктора на постоянных магнитах с изотропным телом в рабочем зазоре показан на рис. 3.

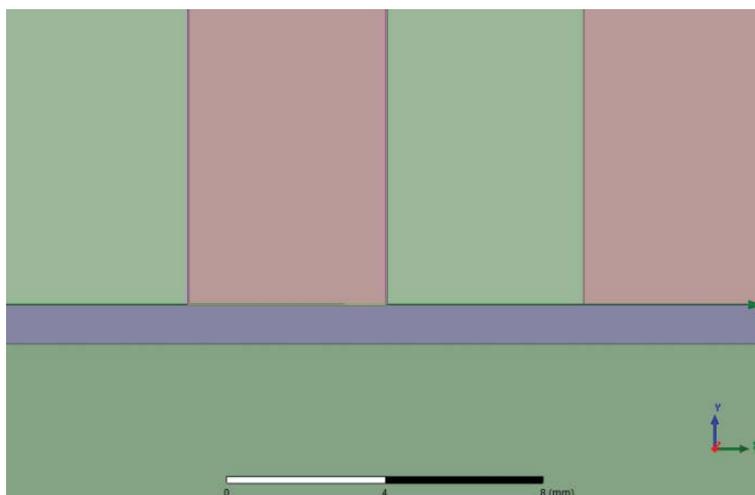


Рис. 3. Фрагмент магнитной системы индуктора на постоянных магнитах с изотропным телом в рабочем зазоре

Результаты и обсуждение

При расчете на суперкомпьютере магнитной индукции в магнитной системе первым способом, время расчета составило порядка 4 часов. При расчете вторым способом, время расчета при тех же условиях составило около 15 секунд. Колоссальная разница во времени объясняется тем, что при проведении расчетов методом конечных элементов строится сетка, параметры которой, в том числе,

зависят и от геометрии рассчитываемых тел. Так как диаметр одной магнитно-абразивной частицы в нашем исследовании составляет 0.2 мм, а количество частиц только в расчетной плоскости рабочего зазора составило более 2500 штук, то разница параметров частоты сетки, по сравнению со вторым способом, была более чем существенная.

При всем вышеперечисленном, существенная погрешность при расчете двумя методами отсутствует, и составляет 4%. В итоге получаем практически мгновенный расчет магнитной индукции без потери точности полученных результатов (рис. 4) [7].

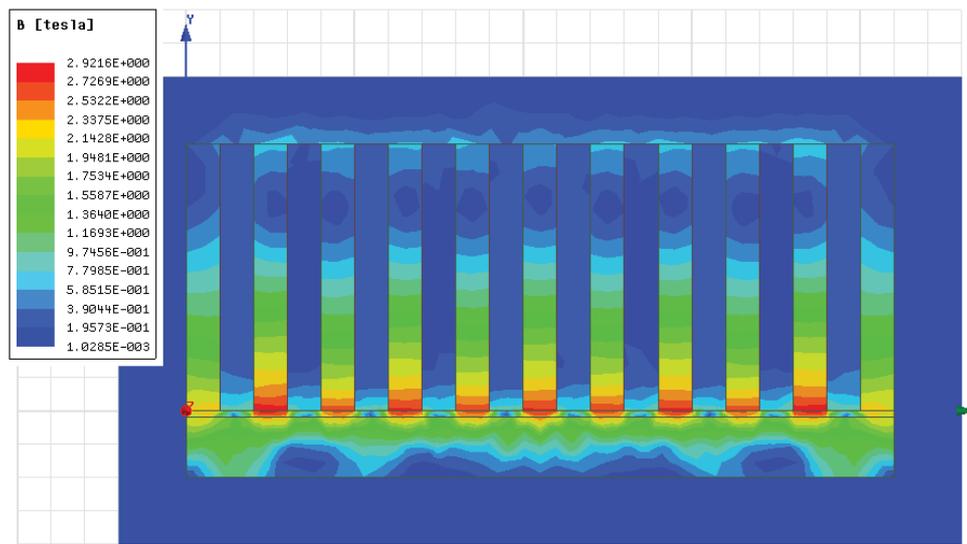


Рис.4. Картина магнитной индукции поля при магнитно – абразивной обработке

Выводы

В исследовании было доказано, что возможно более чем значительно ускорить процесс расчета магнитной индукции в магнитной системе индуктора на постоянных магнитах в процессе магнитно-абразивной обработки. При этом, уменьшение времени расчета не уменьшает точность полученных результатов. При помощи полученных значений магнитной индукции появляется возможность для прогнозирования распределения ферромагнитного порошка в рабочем зазоре, а также, становится возможным рассчитать силы резания при обработке.

Список литературы

1. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная обработка изделий и режущих инструментов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1986. – 176 с.
2. Иконников, А.М. Конструирование оснастки для магнитно-абразивного полирования путем имитационного моделирования / А.М. Иконников, В.С. Силивакин, Р.В. Гребеньков // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы», Рубцовск, 2013. - С. 80 – 82.
3. Сабоннадьер, Ж.-К., Кулон, Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР. М.: Мир, 1989. 190 с.
4. Сакулевич, Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. — Мн: Наука и техника, 1981. — 328 с.

5. Леонов, С.Л. Автоматическое регулирование рабочего зазора при магнитно-абразивной обработке пространственного сложных поверхностей / С.Л. Леонов, А.М. Иконников, Р.В. Гребеньков // Материалы 1-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении», Новосибирск, 2014 - С. 162 – 166.
6. Гребеньков, Р.В., Татаркин, Е.Ю., Иконников, А.М. Математическое моделирование съема обрабатываемого материала в процессе магнитно-абразивной обработки для определения периода стойкости порошка // Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2015», Пермь, 2015. Изд-во ПНИПУ: С. 304 – 307.
7. Татаркин, Е.Ю. Совершенствование технологических процессов изготовления деталей с помощью методики функционально-стоимостного анализа / Е.Ю. Татаркин, А.М. Иконников, Р.В. Гребеньков, С.С. Просеков // Ползуновский вестник. - 2016. - №3. - С. 57 – 62.

**FEATURES OF THE APPLICATION OF THE FINITE ELEMENT METHOD
WHEN MODELING THE MAGNETIC FIELD
OF THE INDUCTOR WITH PERMANENT MAGNETS
IN THE PROCESS OF MAGNETIC ABRASIVE MACHINING**

¹Leonov S.L., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: sergey_and_nady@mail.ru

¹Ikonnikov A.M., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e – mail: iamagtu@mail.ru

¹Grebekov R.V., Graduate Student, e – mail: sigaset@yandex.ru

²Adam Kulawik, Professor

¹Polzunov Altai State Technical University, Prospekt Lenina, 46, Barnaul, 656038, Russian Federation

²Czestochowa University of Technology, 73 ul. J. H. Dąbrowskiego, Czestochowa, 42 – 201, Polska

Abstract

The authors present the features of the application of the finite element method when modeling the magnetic field of the inductor with permanent magnets in the process of magnetic abrasive machining. Finite element method based on approximation of continuous functions by a discrete model. A continuous function in our case is the parameter of the magnetic field. The discrete model is based on the set of piecewise continuous functions defined on a finite number of subdomains called finite elements. The finite element method implemented in Ansys. This study produced two ways of calculating the magnetic induction. The first is completely filled with ferromagnetic powder in the working gap. The second method of calculation is to replace the ferromagnetic powder of a solid isotropic body. A significant error in the calculation of the two methods is missing. The result is a virtually instantaneous calculation of the magnetic induction without loss of accuracy of the results. Using the obtained values of the magnetic induction it is possible to predict the distribution of ferromagnetic powder in the working gap, and it is also possible to calculate the cutting forces during machining.

Keywords: magnetic-abrasive machining, permanent magnet, magnetic field, magnetic induction, finite element method.

УДК 621.9.047

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ АНОДНОГО ПОВЕДЕНИЯ
ARMCO – ЖЕЛЕЗА И ТИТАНОВОГО СПЛАВА ОТ – 4 В ВОДНОМ
РАСТВОРЕ НИТРАТА НАТРИЯ**

*ГААР Н. П., канд. техн. наук,
ЛОКТИОНОВ А. А., старший препод.,
ДАВЫДОВА С. А., магистрант,
ИВАНОВА Ю. С., магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Гаар Н.П. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e – mail: gaar@corp.nstu.ru

Аннотация

Исследованы особенности анодного растворения титанового сплава ОТ – 4 и ARMCO – железа в водных растворах нитрата натрия при концентрации соли в электролите от 10 до 30 % в диапазоне потенциалов от 0 до 5 В. Исследования проводились при помощи потенциодинамического и потенциостатического метода. Установлено, что титановый сплав ОТ – 4 электрохимически не растворяется в водных растворах нитрата натрия из-за образования на поверхности окисных пленок. Анодное растворение ARMCO – железа в водных растворах нитрата натрия происходит в диапазоне потенциалов свыше 1,7 В и сопровождается восстановлением кислорода на поверхности материала.

Ключевые слова: электрохимическое растворение, титановые сплавы. ARMCO – железо, нитрат натрия.

Введение

В современном машиностроении электрофизические методы обработки привлекают все большее внимание при обработке материалов, которые имеют ограничения при традиционной механической обработке. С другой стороны, электрофизические методы обработки не характеризуются такой же высокой производительностью как механическая. Ввиду этого, постоянно ведутся поиски по их интенсификации. Электрохимическая обработка также не обошла эту тенденцию.

Среди способов, при помощи которых пытаются активировать процесс анодного растворения материала, наиболее перспективным можно считать лазерно-электрохимическую обработку (ЛЭХО) [1]. При ее использовании лазерное излучение вводится через электролит в зону обработки, благодаря чему задействуются целая гамма механизмов активации процесса электрохимического растворения [2, 3] (гидравлический, тепловой, светогидравлический, химический и т.д.). Однако, использование ЛЭХО требует проведение предварительных исследований для каждого сочетания обрабатываемый материал-электролит с целью определения причин низкой производительности процесса в стационарных условиях, а затем подбора режимов лазерного излучения (длины волны, частоты, средней мощности излучения и т.д.) с позиции достижения максимальной производительности процесса.

В данной работе в качестве исследуемых материалов были выбраны – ARMCO – железо и титановый сплав ОТ – 4. ARMCO – железо было выбрано в связи с тем, что данный материал можно считать практически однокомпонентным, что дает возможность понимания процессов, происходящих

в электрохимической ячейки. Кроме того, его анодное поведение в стационарных условиях более или менее изучено, что позволит сравнить полученные результаты на специально спроектированной для ЛЭХО установки [4] с литературными источниками. Титановые сплавы, представителем которых является ОТ – 4, характеризуются низкой производительностью при электрохимической обработки из – за образования на поверхности окисных пленок различной природы, что дает возможность предположить, что дальнейшее применение для его обработки ЛЭХО будет эффективно в части ее применения для данного класса материалов.

Описание экспериментальных исследований

Традиционно исследование анодного поведения материала производится при помощи поляризационных методик – потенциодинамической и потенциостатической. Использование потенциодинамического метода позволяет определить участки активного и пассивного растворения материала в исследуемом диапазоне потенциалов, а потенциостатический – подтвердить характер процессов протекающих при определенном значении потенциала, чтобы исключить влияние инерционных процессов при непрерывной развертки потенциалов.

Исследования проводились на специально изготовленной установки [4], позволяющей проводить как поляризационные исследования в стационарных условиях (без наложения лазерного излучения), так и в дальнейшем – с наложением лазерного излучения различными длинами волн и их комбинациями. Это позволит обеспечить идентичность условий проведения экспериментов.

В состав установки для поляризационных исследований в стационарных (без наложения лазерного излучения) условиях входит: нестандартная электрохимическая ячейка [5]; персональный компьютер, с установленным на нем программным обеспечением; потенциостат – гальваностат IPC-Pro (рис. 1). В качестве электрода сравнения в ячейке используется платиновый электрод.

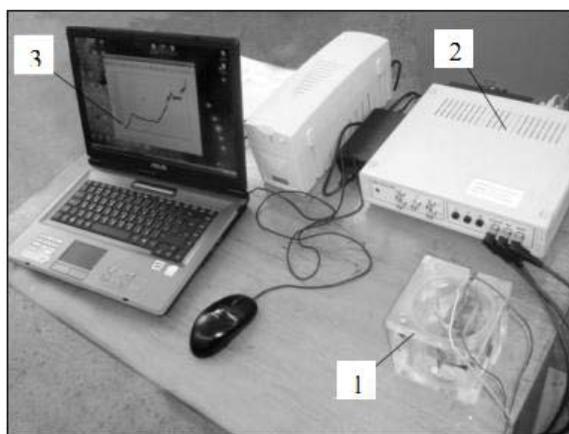


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки для исследования анодного поведения материала при помощи поляризационных исследований:

1 – электрохимическая ячейка, 2 – потенциостат IPC-Pro,

3 – персональный компьютер

В качестве электролита был выбран водный раствор нитрата натрия с концентрацией соли от 10 до 30 %. Данный электролит является распространенным. Он используется в электрохимической промышленности для большого числа обрабатываемых электрохимически материалов. Кроме того, данный состав электролита соответствует требованиям к электролитам при лазерно – электрохимической обработке [6, 7].

Результаты и обсуждения

На рис 2 – 5 представлены поляризационные кривые, полученные при помощи потенциодинамического метода для ARMCO – железа. Поляризационные исследования по анодному растворению титанового сплава ОТ – 4 не приведены, так для всех концентраций во всем диапазоне потенциалов значение плотности тока были равны нулю, что свидетельствует об отсутствии процесса анодного растворения материала как такового. Возможной причиной такого состояния материала может служить образование на поверхности пленок, которые покрывая ее, запирают процесс растворения материала, что подтверждается данными работы [8]. Увеличение концентрации соли не привело к изменению анодного поведения титанового сплава.

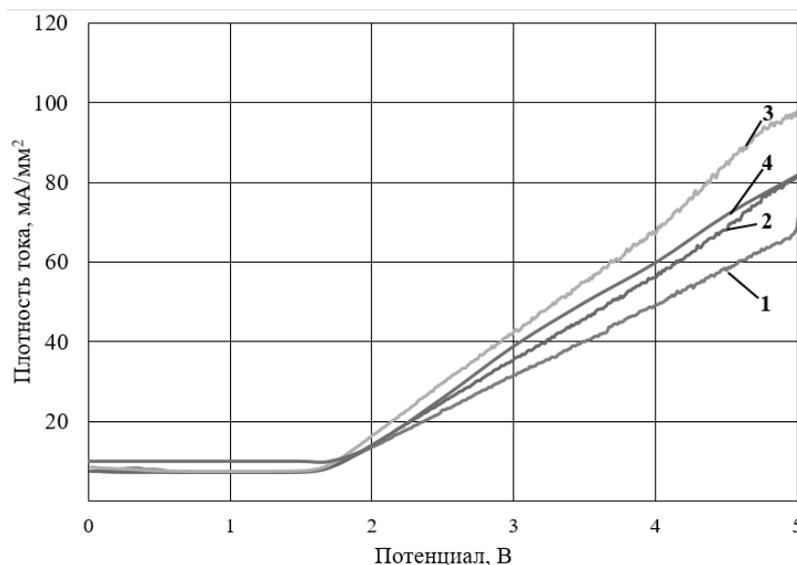


Рис.2. Потенциодинамические кривые для ARMCO – железа в водных растворах нитрата натрия при концентрации соли:
1 – 10%, 2 – 15%, 3 – 20%, 4 – 30%

Анализ поляризационной кривой (рис. 2), полученной при помощи потенциодинамического метода для всех исследуемых концентраций соли электролита указывает на тот факт, что поляризационные кривые имеют два характерных участка поляризационной кривой – в диапазоне потенциалов от 0 до 1,7 В, где значение плотности тока с ростом потенциала остается постоянным, и в диапазоне потенциалов свыше 1,7 В до 5 В, где наблюдается рост плотности тока с увеличением потенциала. С точки зрения электрохимических процессов первый участок поляризационной кривой следует рассматривать как участок пассивного растворения материала, а второй – активного.

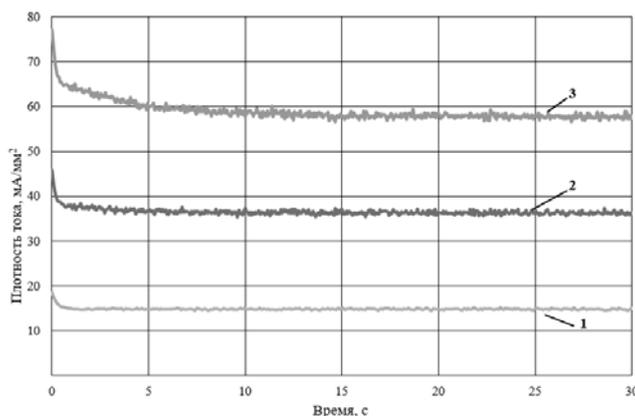


Рис. 3. Потенциостатические кривые для ARMCO – железа в водных растворах нитрата натрия при концентрации соли 10% для потенциалов: 1 – 2 В, 2 – 3 В, 3 – 4 В

Сравнение между собой поляризационных кривых, полученных при помощи потенциодинамического метода для концентрации соли от 10 до 20 %, указывает на тот факт, что увеличение ее концентрации в электролите приводит к увеличению достигаемых значений плотностей тока для одних и тех же значений потенциалов. Так при концентрации нитрата натрия равным 10 % максимальное значение плотности (при потенциале 5 В) тока равно 67 mA/mm^2 , тогда как при концентрации в 15 % - 81 mA/mm^2 ; 20 % - 97 mA/mm^2 . Повышение концентрации нитрата натрия до 30 % приводит к снижению достигаемых значений плотности тока по сравнению с 20 % концентрацией соли (до 82 mA/mm^2 при потенциале 5 В). Это может объясняться тем фактом, что при концентрации нитрата натрия свыше 20 % динамическая вязкость электролита достигает такого значения, при котором движение анионов электролита замедляется, вследствие чего скорость анодных процессов снижается. Это приводит, в свою очередь, к снижению плотности тока.

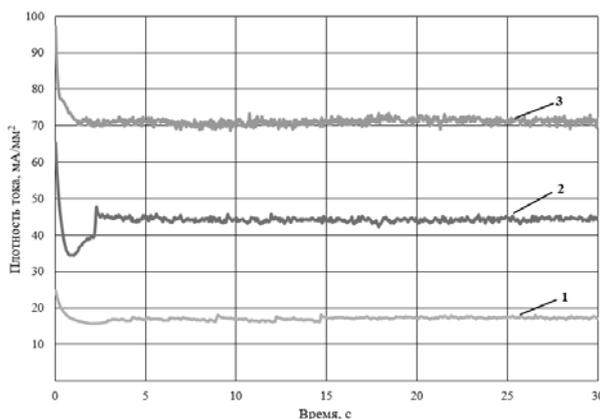


Рис. 4. Потенциостатические кривые для ARMCO – железа в водных растворах нитрата натрия при концентрации соли 15 % для потенциалов: 1 – 2 В, 2 – 3 В, 3 – 4 В

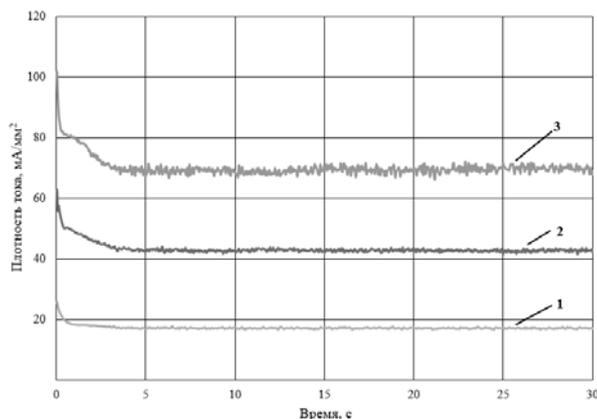


Рис. 5. Потенциостатические кривые для ARMCO – железа в водных растворах нитрата натрия при концентрации соли 20% для потенциалов: 1 – 1 В, 2 – 2 В, 3 – 3 В, 4 – 4 В

Для подтверждения характера (без возможного влияния инерционных процессов при развертке потенциалов) растворения на полученных на потенциодинамических кривых были сняты потенциостатические кривые для всех исследуемых концентраций соли для одних и тех же потенциалов – 2 В, 3 В, 4 В (рис. 3 – 5). Анализ полученных потенциостатических кривых подтверждает характер протекания стабильного процесса в обозначенных областях, так как плотность тока со временем не падает, а остается постоянным. С другой стороны визуальный осмотр образцов после проведения потенциостатических исследований не выявил какого-либо растворения поверхности материала образца даже при увеличении времени снятия кривых с 30 секунд до 5 минут. Это говорит о том, что процесс, который был зафиксирован при снятии потенциодинамических кривых и подтвержденный после снятия потенциостатических кривых, в большей степени связан не с растворением материала, а с другими процессами которые могут протекать на поверхности образца, например, восстановление кислорода. Такое предположение, с одной стороны, подтверждается тем, что процессы снятия поляризационных кривых для ARMCO – железа в нитрате натрия при всех концентрациях соли визуально сопровождались выделением пузырьков газа непосредственно на аноде. Потенциал восстановления кислорода ~2 В [8], а именно при приближении к нему на поляризационных кривых для ARMCO – железа начинается смена характерных участков растворения материала с пассивного на активный, где происходит увеличение значения плотности тока (рис. 2) с ростом потенциала.

Выводы

После проведенного анализа полученных результатов поляризационных исследований анодного поведения титанового сплава ОТ – 4 и АМСО – железа в водных растворах нитрата натрия при концентрации соли от 10 до 30 % можно сделать следующие выводы:

1. Титановый сплав ОТ – 4 в 10 % водном растворе хлорида натрия в диапазоне потенциалов от 0 до 5 В не растворяется из-за образования на поверхности окисных пленок различной природы. Увеличение концентрации соли с 10 % до 30 % не влияет на анодное растворение материала, т.е. растворения материала не происходит.

2. Электрохимического растворения ARMCO – железа в водных растворах нитрата натрия в диапазоне потенциалов от 0 до 1,7 В не происходит. В диапазоне потенциалов свыше 1,7 В до 5 В анодное растворение материала происходит крайне медленно.

Повышение плотности тока в указанном диапазоне происходит за счет процесса восстановления кислорода на поверхности образца. Увеличение значения концентрации соли в электролите не приводит к интенсификации процесса анодного растворения материала, а рост плотности тока с увеличением концентрации соли происходит за счет увеличения количества восстановившегося кислорода.

На основании вышеизложенных фактов можно предположить, что для титанового сплава ОТ – 4 одним из направлений активации процесса электрохимического растворения в данном электролите при наложении лазерного излучения может быть разрушение окисных пленок. Для интенсификации процесса электрохимического растворения ARMCO – железа – это борьба с запираемостью поверхности анода пузырьками газа (кислорода) за счет, например, светогидравлического или гидравлического механизма, возникающего при наложении лазерного излучения. Подтверждение данных предположений требует проведения дополнительных исследований.

Список литературы

1. Рахимьянов Х.М., Журавлев А.И., Гаар Н.П., Локтионов А.А. Способ размерной обработки металлов и сплавов: способ размерной обработки металлов и сплавов: Патент Рос. фед. № 2451582. 2010. Заявл. 07.07.2010 № 2010128204/02. Оpubл. 27.05.2012, Бюл. № 15. 11 с.
2. Rakhimyanov H.M., Gaar N.P. Possible ways for intensification of dimensional electrochemical machining (DECM) // Proceedings of IFOST-2008 - 3rd International forum on strategic technologies. – Novosibirsk-Tomsk, 2008. – P. 106 – 107.
3. Гаар Н.П., Рахимьянов Х.М. Пути интенсификации электрохимической размерной обработки // Ползуновский альманах. – 2008. – № 4. – С. 191 – 192.
4. Рахимьянов Х.М., Журавлев А.И., Гаар Н.П. Установка для исследования электрохимических процессов в условиях лазерной активации процесса электрохимической размерной обработки // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 2. – С. 135 – 144.
5. Электрохимическая ячейка для исследования интенсификации ЭХРО лазерным излучением. / Н. П. Гаар, Х. М. Рахимьянов // Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса. Труды первой всероссийской научно-технической конференции, конф., Кемерово., 24-25 октября 2007 г.-Кемерово : ГУ КузГТУ, 2007 г. - С. 251 – 254.
6. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Гаар Н.П., Журавлев А.И., Локтионов А.А. Методика выбора электролита для лазерно-электрохимической обработки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 2. – С. 18 – 21.
7. Рахимьянов Х.М., Гаар Н.П., Красильников Б.А., Журавлев А.И. Особенности выбора электролитов в условиях лазерно-электрохимической обработки // Высокие, критичные электро- и нано- технологии: труды Всероссийской научно-технической конференции. – Тула, 2011. – С. 23 – 26.
8. Электродные процессы и процессы переноса при электрохимической размерной обработке металлов/А.И. Дикусар, Г.Р. Энгельгардт, В.И. Петренко, Ю.Н. Петров. Электродные процессы и процессы переноса при электрохимической размерной обработке металлов. Кишинев: Издательство «Штиинца», 1983 г. – 206 с.

**RESEARCH ON FEATURES OF ANODE BEHAVIOR OF ARMCO – IRON AND
TITANIUM ALLOY IN AQUEOUS SOLUTION OF SODIUM NITRATE**

Gaar N.P. Ph.D. (Engineering), Associate professor, e – mail: gaar@corp.nstu.ru

Loktionov A.A., M.Sc. (Engineering), Senior lecturer, e – mail: loktionov@corp.nstu.ru

Davydova S.A. Graduate students, Master’s Degree student, e – mail: davydovas.a@mail.ru

Ivanova Yu.S. Graduate students, Master’s Degree student, e – mail: lilul207@yandex.ru

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

Features of anode dissolution of titanium alloy and ARMCO iron in aqueous solutions of sodium nitrate at concentration of salt in electrolyte from 10 to 30 % in the range of potentials from 0 to 5 V are researched. Research conducted by means of a potentiodynamical and potentiostatic method. It is established that titanium alloy is not electrochemically soluble in aqueous solutions of sodium nitrate due to the formation of oxidized films on the surface. Anode dissolution of ARMCO iron in aqueous solutions of sodium nitrate occurs in the range of potentials over 1,7 V and is followed by oxygen recovery on the surface of material.

Keywords: electrochemical dissolution, titanium alloys, ARMCO – iron, sodium nitrate.

УДК 621.791.947.55, 621.9.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ РЕЗА ПРИ СМЕНЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАСКРОЯ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКОЙ

*ГААР Н. П., канд. техн. наук,
ЛОКТИОНОВ А. А., старший препод.,
ГЕРАСИМОВ Н. В., магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Локтионов А.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e – mail: loktionov@corp.nstu.ru

Аннотация

Исследовано появление радиусов скругления в местах смены направления движения при тонкоструйной плазменной резке стали Ст3 для толщин от 4 до 20 мм при использовании технологии HiFocus^{plus}. Установлено, что радиус скругления материала увеличивается с ростом толщины разрезаемого материала. Предложено использование «петель» в траектории движения для исключения участков разгона и торможения на контуре при резке материалов. Исследовано влияние применения «петель» на значения радиуса скругления. Установлено, что применение «петель» приводит к снижению значений радиуса скругления до 2^x раз по сравнению с раскроем материала без их использования.

Ключевые слова: тонкоструйная плазменная резка, радиусы скругления, дефекты при резке материалов.

Введение

Тонкоструйная плазменная резка является одной из современных методов раскроя листового материала. Процесс разделения материала при этом способе происходит за счет разогрева материала сжатой плазменной дугой до температуры плавления и выдува расплавленного материала из зоны обработки. Точность и качество реза при данном методе обработки будут, в первую очередь, зависеть от технологических параметров обработки [1 – 7]. Однако, в связи с особенностями физики процесса на поверхности деталей могут возникать дефекты, не зависящие от выбранных режимов обработки. Например, при обработке изделий типа «прямоугольник» на углах возникают точки с нулевой скоростью при смене направления движения (рис.1). Вблизи точки смены направления существуют участки торможения и разгона. Поскольку в отмеченной области время контакта обрабатываемого материала с плазменной дугой увеличивается, это приводит к большему оплавлению поверхности реза и, как следствие, к искажению профиля (появлению дефекта в виде скругления угла). Эти дефекты снижают точность изготавливаемой детали.

В данной работе рассматривается вариант по минимизации данного дефекта, который заключается в использовании в таких случаях так называемых «петель» (рис. 2). Предполагается, что использование такой траектории резки листового материала должно приводить к снижению времени контакта плазменной дуги с обрабатываемым материалом на углах детали. Это должно снизить вероятность образования дефекта в виде скругления.

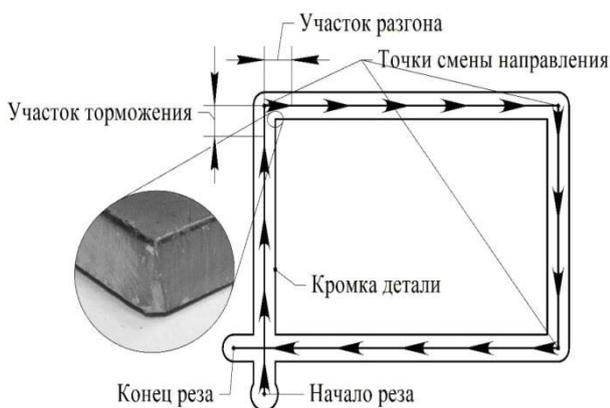


Рис. 1. Смена направления при резке

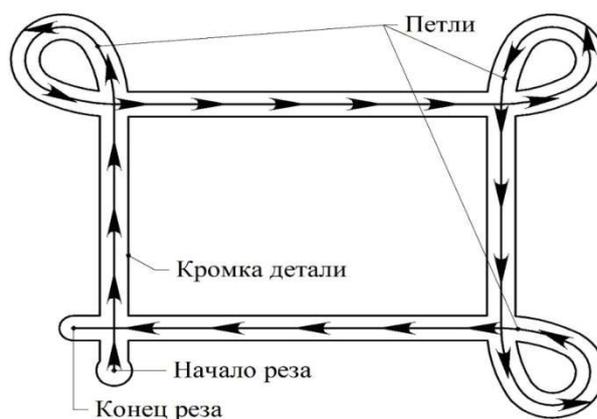


Рис. 2. Схема обработки при использовании «петель»

Описание экспериментальных исследований

Исследования проводились на машине термической резки «Гермит ППл» на базе установки тонкоструйной плазменной резки HiFocus 130i производства фирмы Kjellberg (ФРГ). Данная машина термической резки позволяет осуществлять раскрой листовых материалов из конструкционных, нержавеющей сталей, а также сплавов на основе меди и алюминия [8 – 10]. Отмеченное оборудование состоит из следующих блоков: система ЧПУ Burny Phantom ST (1), координатный стол (2), источник тока с газовой консолью HiFocus 130i (3), плазматрон PerCut 160 (4), газобаллонное оборудование (5) (рис. 3). Раскрой листового материала производился с использованием технологии тонкоструйной плазменной резки HiFocus^{plus}.

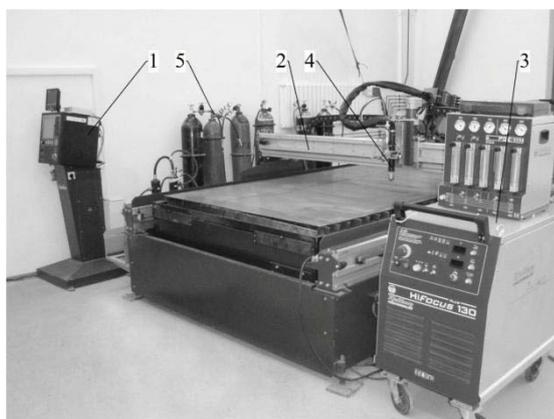


Рис. 3. Машина термической резки «Гермит ППл»

Исследования проводились при раскросе листового материала стали Ст3 толщиной: 4, 6, 10, 16, 20 мм. В соответствии с рассматриваемой технологией и отмеченными толщинами по рекомендациям завода-изготовителя оборудования были выбраны расходные элементы плазматрона (Табл. 1), режимы обработки (Табл. 2), газы с необходимым давлением и расходом (Табл. 3)

Таблица 1

| Технология резки | Толщина, мм | Катод | Газификатор | Сопло | Колпачок сопла | Колпачок завихряющего газа | Защитный колпачок |
|-------------------------|-------------|-------|-------------|--------|----------------|----------------------------|-------------------|
| HiFocus ^{plus} | 4 | S002 | Z102 | S2008x | S3028 | Z4020 | Z501 |
| | 6 | | | S2012x | | Z4022 | |
| | 10 | | | | | Z4025 | |
| | 16 | | | | | | |
| | 20 | | | | | | |

Таблица 2

| Технология резки | Толщина, мм | Ток, А | Скорость резки, м/мин | Время пробивки, сек | Высота пробивки, мм | Высота реза, мм | Напряжение, В |
|-------------------------|-------------|--------|-----------------------|---------------------|---------------------|-----------------|---------------|
| HiFocus ^{plus} | 4 | 50 | 2,2 | 0,2 | 3 | 1,5 | 119 |
| | 6 | 50 | 1,5 | 0,3 | 3 | 2 | 125 |
| | 10 | 130 | 2,4 | 0,4 | 4 | 2 | 133 |
| | 16 | 130 | 1,8 | 0,4 | 5 | 2 | 140 |
| | 20 | 130 | 1 | 0,6 | 6,5 | 2,5 | 150 |

Таблица 3

| Технология резки | Толщина, мм | Зажигающий газ - воздух (давление/расход) | Режущий газ – кислород (давление/расход) | Завихряющий газ – азот (давление/расход) |
|-------------------------|-------------|---|--|--|
| HiFocus ^{plus} | 4 | 5 бар/15 дел. шкалы | 10 бар/20 дел. шкалы | 5 бар/50 дел. шкалы |
| | 6 | 5 бар/20 дел. шкалы | 10 бар/20 дел. шкалы | 5 бар/40 дел. шкалы |
| | 10 | 5 бар/25 дел. шкалы | 10 бар/60 дел. шкалы | 5 бар/45 дел. шкалы |
| | 16 | 5 бар/25 дел. шкалы | 10 бар/60 дел. шкалы | 5 бар/60 дел. шкалы |
| | 20 | 5 бар/25 дел. шкалы | 10 бар/60 дел. шкалы | 5 бар/90 дел. шкалы |

Для каждой разрезаемой толщины материала было проведено 5 опытов, как при резке без использования «петель», так и в случае их использования. Получившиеся радиусы скругления на углах оценивались при помощи измерительного микроскопа Nikon MM – 400.

Результаты и обсуждения

Результаты исследований по определению радиусов скругления в зависимости от толщины материала без использования «петель» и с их использованием приведены на рис. 4.

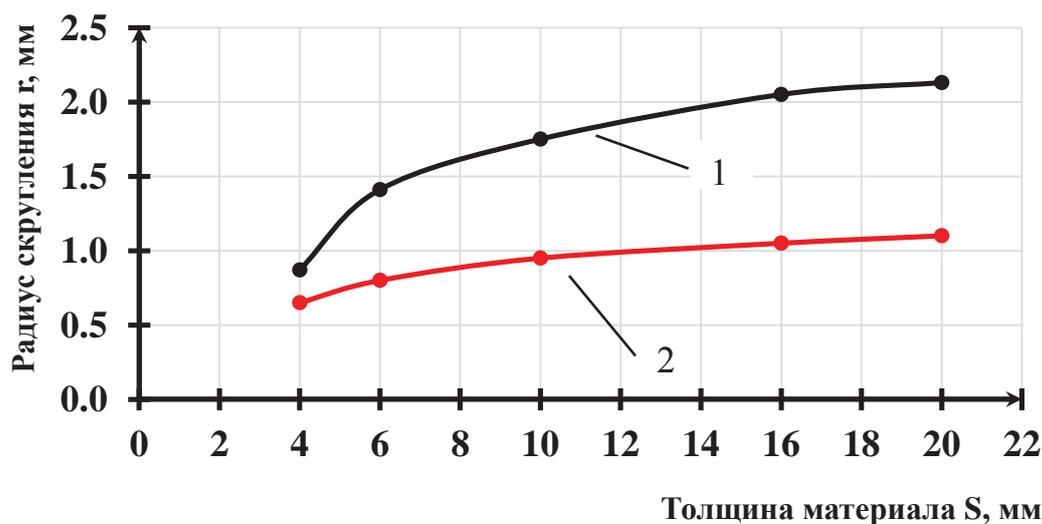


Рис. 4. Значение радиуса скругления в зависимости от толщины материала:
1 – траектория движения без «петель»; 2 – траектория движения с «петлями»

Анализируя зависимость, представленную на рис. 4, при обработке без использования «петель» в траектории движения, можно отметить, что радиус скругления на углах увеличивается с ростом толщины материала. Так для толщины равной 4 мм эта величина составляет 0,87 мм, а для толщины 20 мм – 2,13 мм. Подобная зависимость может быть объяснена следующим образом: с увеличением толщины разрезаемого материала требуется увеличение необходимой плотности мощности. В свою очередь, это приводит к тому, что за одной и тоже время происходит проплавление большего объема материала, что приводит к увеличению скругления кромки реза.

Применение «петель», как показано на рис. 4, не приводит к исчезновению данного дефекта, но позволяет снизить радиус скругления во всем исследуемом диапазоне толщин практически в 2 раза. Так значение радиуса скругления для толщины 6 мм снизилось с 1,41 мм до 0,8 мм, а для толщины 20 мм – с 2,13 мм до 1,1 мм. Снижение значений радиуса скругления происходит за счет того, что смена направления движения за счет применения «петель» исключает участки торможения и разгона, благодаря чему уменьшается время контакта сжатой плазменной дуги с одним и тем же участком материала на углу.

Выводы

Использовании «петель» в траектории движения на углах при раскрое материала толщиной от 4 до 20 мм тонкоструйной плазменной резкой позволяет уменьшить радиусы скругления до 2^x раз.

Список литературы

1. Рахимянов Х.М., Гаар Н.П., Журавлев А.И., Локтионов А.А., Рахимянов А.Х. Влияние скорости обработки на положение анодного пятна и перпендикулярность кромок при тонкоструйном плазменном раскрое//Механика XXI века. – 2015. - № 14. – С. 119 – 122.
2. Локтионов А.А. Оценка качества реза листовых материалов при тонкоструйной плазменной резке//Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2013. - № 4 (61). – С . 86 – 91.

3. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А., Никитин Ю.В. Оценка геометрической точности реза листовых материалов при различных технологиях тонкоструйной плазменной резки//Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2013. № 3 (60). С. 25 – 30.
4. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А. Особенности формирования кромок при тонкоструйной плазменной резке листового материала // Инновации в машиностроении: сборник трудов 2 Международной научно-практической конференции. -Кемерово, 2011. – С. 416 – 419.
5. Loktionov A.A., Gaar N.P. Influence of Technological Parameters of High-Precision Plasma Cutting on the Position of the Anode Spot on the Cut Edge//Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 788. P. 46 – 51.
6. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А. Анализ погрешностей формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов//Современные проблемы в технологии машиностроения: всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения профессора Муханова И.И.: сборник трудов. -Новосибирск, 2009. – С. 151 – 153.
7. Рахимьянов Х.М., Локтионов А.А. Точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов и пути ее повышения//Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2009. № 4. С. 31 – 32.
8. Рахимьянов А.Х., Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А. Технологические особенности раскроя биметаллического соединения «сталь Ст3 + сталь 12Х18Н10Т» при тонкоструйной плазменной резке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014 - № 3 (64). – С. 51 – 67.
9. Рахимьянов А.Х. Тонкоструйная плазменная резка медных сплавов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Международной научно-технической конференции / под ред. А.Г. Сулова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 66 – 70.
- 10.Рахимьянов А.Х., Красильников Б.А. Технологические особенности плазменного раскроя алюминиевых сплавов // Инновации в машиностроении – основа технического развития России: материалы VI Международной научно-технической конференции / под ред. А.Г. Сулова, А.М. Маркова. – Барнаул, 2014. – Ч. 2. – С. 71 – 77.

RESEARCH ON DEFECTS OF CUT WHEN CHANGING THE CUTTING DIRECTION BY HIGH – PRECISION PLASMA CUTTING OF SHEET MATERIAL

Gaar N. P. Ph.D. (Engineering), Associate professor, e – mail: gaar@corp.nstu.ru

Loktionov A. A. M.Sc. (Engineering), Senior lecturer, e – mail: loktionov@corp.nstu.ru

Gerasimov N.V. Master student, e – mail: gnv93@yandex.ru

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The emergence of radii of rounding in the places of the direction change of plasma arc motion during high-precision plasma cutting of steel St3 with thicknesses from 4 to 20 mm investigated. The HiFocusplus technology is used in investigations. It is established that the radius of rounding increases with the thickness of the cut material growth. The use of "loops" in the trajectory of motion is suggested to exclude the acceleration and deceleration sections on the contour when cutting. The influence of "loops" application on the values of the radii of rounding is investigated. It is established that the use of "loops" leads to a decrease in radii of rounding up to 2x times in comparison with the cutting of the material without using ones.

Keywords: High-precision plasma cutting, radii of rounding, defects in cutting materials

УДК 621.313.282.2

**РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ УДАРНОЙ МАШИНЫ С
ИНЕРЦИОННЫМ РЕВЕРСОМ БОЙКА**

*НЕЙМАН Л. А., канд. техн. наук, доцент
(НГТУ, г Новосибирск, Россия)*

Неyman Л.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет
e – mail: neyman31@gmail.com

Аннотация

Разработана математическая модель динамики электромагнитного ударного узла, двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка, включающая в себя многомассовую колебательную систему с упругими связями и получающую питание от однофазного источника напряжения промышленной частоты по однополупериодной схеме выпрямления. Основу модели составляют дифференциальные уравнения, описывающие электрическое равновесие нелинейной системы и механическое взаимодействие поступательно движущихся масс, полученные с помощью уравнения Лагранжа второго рода. Методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink рассмотрен пример численной реализации модели ударного узла с потерями энергии.

Ключевые слова: ударный узел, синхронная электромагнитная машина, математическая модель, механическая колебательная система, упругие связи, уравнение Лагранжа второго рода, анализ рабочих процессов.

Введение

Ударные машины и механизмы с электроприводами возвратно-поступательного движения находят широкое применение в промышленности для обеспечения многих технологических процессов [1 – 3].

Перспективным направлением исследований в данной области является совершенствование машин и механизмов, созданных на основе электромагнитного привода ударного действия [4 – 8].

Механическая система такого электропривода обеспечивает относительно высокую его надежность и повышенный ресурс работы при воздействии ударных нагрузок, а также некоторое снижение энергопотребления при работе в околорезонансных режимах.

Как обладающие более высокими энергетическими показателями следует выделить синхронные электромагнитные машины ударного действия (СЭМУД), для которых частота механических колебаний ударной массы бойка кратна частоте питающей сети [9 – 13].

Существующие сегодня методики точного учета конструктивных параметров синхронных машин ударного действия основаны в своем большинстве на статических подходах и позволяют в разной степени улучшать их силовые и энергетические показатели [14 – 17].

Повышение эффективности работы синхронных электромагнитных машин и снижение энергопотребления возможно только при условии рационального выбора параметров электромеханической системы ударного узла. Как правило, выбор параметров ударного узла связан с учетом большого числа взаимосвязанных факторов, зависящих от скорости движения бойка и частоты ударных им

пульсов сил, степени подвижности инерционных масс и свойств упругих связей механической системы, нелинейности характеристик магнитных материалов и т.д. [18 – 21].

Упрощение связей в подобных системах, работающих исключительно в переходных режимах, существенно ограничивает в возможностях рационального выбора параметров электромеханической ударной системы. Поэтому создание математической модели СЭМУД, наиболее объективно отражающей рабочий процесс электромагнитного ударного узла является решением актуальной задачи.

Электромагнитный ударный узел с инерционным реверсом бойка

Конструктивная схема ударного узла двухкатушечной СЭМУД приведена на рис. 1.

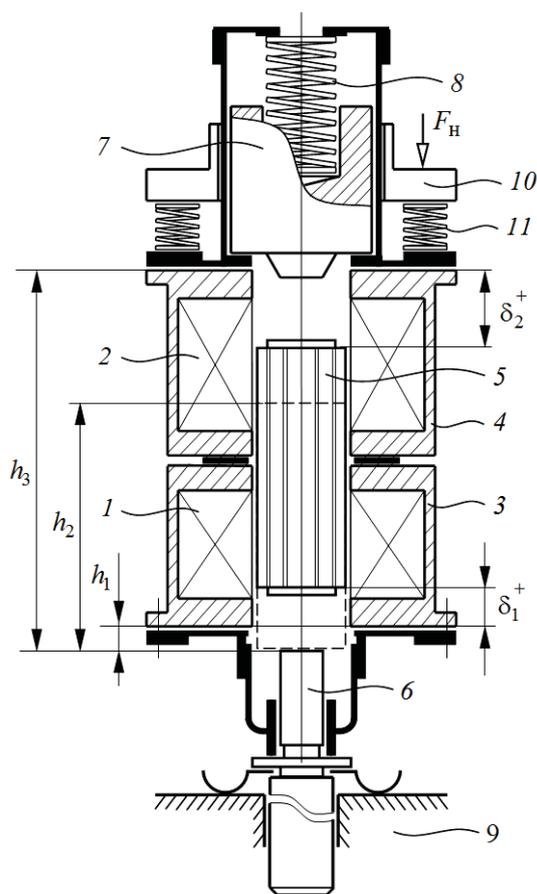


Рис. 1. Электромагнитный ударный узел СЭМУД

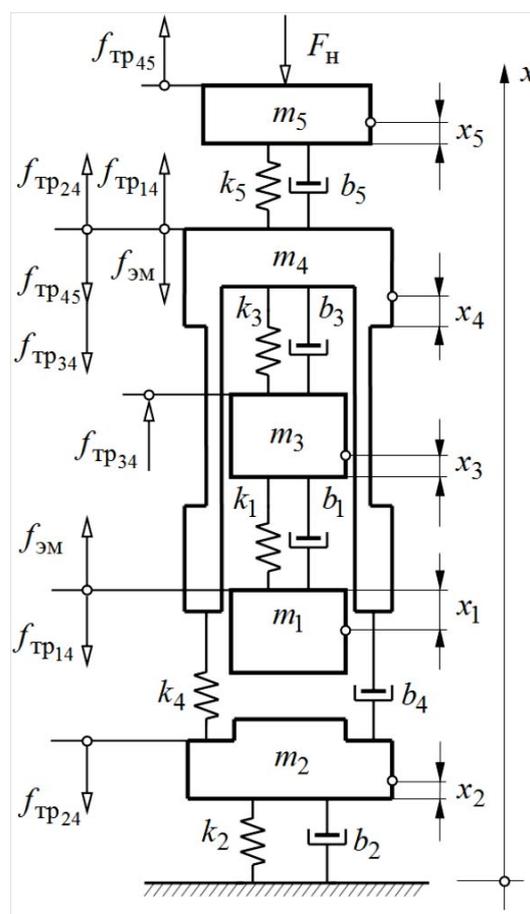


Рис. 2. Расчетная динамическая схема ударного узла

Для реализации рабочего цикла используется система из двух катушек прямого 1 и обратного 2 хода, заключенных в магнитопроводы 3 и 4, которые обеспечивают разгон ударной массы бойка 5 электромагнитными силами в двух направлениях. Совершая возвратно-поступательные движения, боек 5 периодически взаимодействует с рабочим инструментом 6 и с массивным инерционным преобразователем 7, который выполняет его остановку и реверс. При ударном взаимодействии движение инерционного преобразователя 7 происходит в направлении, противоположном направлению движе

ния бойка 5, а его кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию при сжатии пружины 8. После ударного взаимодействия бойка 5 с рабочим инструментом 6 и передаче энергии в деформируемую среду 9 движение бойка под действием электромагнитных сил катушки обратного хода 2 выполняется в направлении движущемуся ему навстречу инерционного преобразователя 7. Далее цикл повторяется.

Для снижения амплитуды вибраций в промежутке между крепежным устройством 10 и основанием электропривода установлен виброизолирующий упругий элемент 11. Усилие нажатия F_H обеспечивает необходимую устойчивую связь ударного узла с рабочим инструментом. Катушки получают питание от однофазного источника напряжения промышленной частота по однополупериодной схеме выпрямления. За время одного периода напряжения рабочий цикл ударного узла обеспечивает синхронную частоту ударных импульсов сил $n_{уд} = 3000$ уд/мин и длительность времени рабочего цикла $t_{ц} = 0,02$ с.

Методы решения

На начальном этапе реализации модели полагаем, что ударного взаимодействия в механической системе не возникает, а процесс движения является результатом наложения вынужденных и свободных колебаний системы от действия внешней периодической силы. В этом случае механическая и магнитная системы (рис. 1) связаны зависимостями электромагнитного усилия $f_{эм1} = f(i_1, x_1)$ и $f_{эм2} = f(i_2, x_1)$ от величины протекающего по катушкам тока i_1, i_2 и координаты положения бойка x_1 . Магнитная и электрическая системы связаны зависимостями величины токосцеплений $\psi_{эм1} = f(i_1, x_1)$ и $\psi_{эм2} = f(i_2, x_1)$.

Согласно установленным связям и действующим в системе обобщенным силам, на рис. 2 представлена расчетная схема механической части СЭМУД (рис. 1).

В качестве обобщенных координат здесь выступают линейные перемещения центра масс бойка x_1 массой m_1 , рабочего инструмента x_2 массой m_2 , инерционного преобразователя x_3 массой m_3 , электропривода x_4 массой m_4 и устройства крепежа x_5 с присоединенной к нему массой m_5 .

Уравнения движения механической системы получим на основании уравнения Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i} + Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

где T - кинетическая энергия системы; Π – потенциальная энергия системы;

Φ – диссипативная функция системы (функция Релея); $\frac{\partial \Pi}{\partial x_i}$, $\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i}$, Q_i - обобщенные силы

упругости, сопротивления движению и внешних воздействий, соответствующие i -й обобщенной координате; x_i - обобщенные координаты; \dot{x}_i - обобщенные скорости; N - число степеней свободы механической системы ($N = 5$).

Возвратно-поступательные движения бойка выполняются в ограниченном диапазоне перемещений, не позволяющих бойку выходить за установленные пределы и для описания модели целесообразно воспользоваться следующей системой равенства

$$x_1(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t = nt_{\text{ц}}; \\ h_3 - h_2 - \delta_2^+ + |\delta_2^-|, & \text{если } \frac{dx}{dt} > 0, \text{ при } nt_{\text{ц}} \leq t \leq nt_{\text{ц}} + t_p; \\ h_1 + \delta_1^+ - |\delta_1^-|, & \text{если } \frac{dx}{dt} < 0, \text{ при } nt_{\text{ц}} + t_p \leq t \leq (n+1)t_{\text{ц}}, \end{cases}$$

где δ_1^+ , δ_1^- - рабочий воздушный зазор, образованный положением бойка до выхода и после выхода из полюсной системы катушки прямого хода; δ_2^+ , δ_2^- - аналогично для катушки обратного хода; h_1 , h_2 и h_3 - фиксированные координаты относительно ударного сечения рабочего инструмента (рис. 1); $n = 1, 2, \dots$ - число полных циклов; $t_{\text{ц}} = t_p + t_{\text{п}}$; t_p - длительность времени обратного хода; $t_{\text{п}}$ - длительность времени прямого хода.

Окончательно процесс движения в механической системе рассматриваем, как результат совместного действия вынужденных колебаний механической системы и периодических ударных импульсов сил.

Принимаем положение устойчивого статического равновесия системы за начало отсчета и за нулевой уровень потенциальной энергии.

Внося значения производных от кинетической и потенциальной энергии, и функции Релея в уравнение Лагранжа с учетом действующих внешних обобщенных сил, сил трения скольжения и периодических ударных импульсов сил получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1(t) = i_1 r_1 + \frac{d\psi_1(i_{\mu 1}, x_1)}{dt}; \\ u_2(t) = i_2 r_2 + \frac{d\psi_2(i_{\mu 2}, x_1)}{dt}; \\ i_1 = i_{п1} + i_{\mu 1}; \quad i_2 = i_{п2} + i_{\mu 2}; \\ m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = \begin{cases} N_3 - f_{\text{ЭМ1}}(i_{\mu 1}, x_1) + f_{\text{ЭМ2}}(i_{\mu 2}, x_1) - f_{\text{ТР14}} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt}, \\ \text{если } \frac{dx_1}{dt} > 0, \text{ при } nt_{ц} \leq t \leq nt_{ц} + t_p; \\ -N_1 - f_{\text{ЭМ1}}(i_{\mu 1}, x_1) + f_{\text{ЭМ2}}(i_{\mu 2}, x_1) - f_{\text{ТР14}} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt}, \\ \text{если } \frac{dx_1}{dt} < 0, \text{ при } nt_{ц} + t_p \leq t \leq (n+1)t_{ц}; \end{cases} \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -N_4 - \tilde{\lambda}_2 + \tilde{\lambda}_4 - f_{\text{ТР24}} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \\ m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} = N_2 + \tilde{\lambda}_3 + f_{\text{ТР34}} \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt}; \\ m_4 \frac{d^2 x_4}{dt^2} = -\tilde{\lambda}_3 - \tilde{\lambda}_4 + \tilde{\lambda}_5 + f_{\text{ЭМ1}}(i_{\mu 1}, x_1) - f_{\text{ЭМ2}}(i_{\mu 2}, x_1) + (f_{\text{ТР14}} + f_{\text{ТР24}} - f_{\text{ТР34}} + f_{\text{ТР45}}) \operatorname{sign} \frac{dx_4}{dt}; \\ m_5 \frac{d^2 x_5}{dt^2} = -\tilde{\lambda}_5 + f_{\text{ТР45}} \operatorname{sign} \frac{dx_5}{dt} - F_H, \end{array} \right.$$

$$\tilde{\lambda}_2 = b_2 \frac{dx_2}{dt} + k_2 x_2; \quad \tilde{\lambda}_3 = b_3 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_3 (x_4 - x_3); \quad \tilde{\lambda}_4 = b_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_4 (x_4 - x_2);$$

$$\tilde{\lambda}_5 = b_5 \left(\frac{dx_5}{dt} - \frac{dx_4}{dt} \right) + k_5 (x_5 - x_4);$$

$i_{п1}, i_{п2}$ - составляющие тока потерь, вызванные вихревыми токами и гистерезисом в первой и во второй катушке; $i_{\mu 1}, i_{\mu 2}$ - составляющие намагничивающего тока первой и второй катушки; $u_1(t), u_2(t)$ - напряжение на обмотках катушек; r_1, r_2 - активные сопротивления в цепи катушек.

Полученная система дифференциальных уравнений динамики электромагнитного ударного узла (рис. 1) позволяет производить всесторонний анализ электромеханических процессов в различных режимах, учитывающих нелинейности в магнитной системе, степень подвижности инерционных масс и свойства упругих связей в механической системе сопровождаемые различного рода потерями энергии.

Пример реализации модели

Решение модели выполнялось методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink. Построение структурной модели динамики ударного узла и разработка алгоритма расчета производились в соответствии с имеющимися рекомендациями [22, 23]. Решение полевой части задачи выполнялось при использовании стандартных программ конечно-элементного моделирования магнитного поля [24], с помощью которых определялся массив значений опорных точек статических параметров потокоцепления $\Psi_{\text{ЭМ1}} = f(i_1, \delta_1)$, $\Psi_{\text{ЭМ2}} = f(i_2, \delta_2)$ и электромагнитного усилия $f_{\text{ЭМ1}} = f(i_1, \delta_1)$, $f_{\text{ЭМ2}} = f(i_2, \delta_2)$. Полученный массив значений статических параметров применялся для задания функции двух аргументов в виде стандартных блоков двумерных таблиц в Simulink.

В качестве исходных данных модели использовались данные модернизированного варианта ударного узла ИЭ4207 [1], имеющего следующие параметры: $m_1 = 0,394$ кг; $m_2 = 0,32$ кг; $m_3 = 0,66$ кг; $m_4 = 3,9$ кг; $m_5 = 1,2$ кг; $k_2 = 2 \cdot 10^6$ Н/м; $b_2 = 0$; $k_3 = 12,5 \cdot 10^3$ Н/м; $b_3 = 12$ Н·с/м; $k_4 = 16 \cdot 10^6$ Н/м; $b_5 = 45$ Н·с/м; $k_5 = 6 \cdot 10^3$ Н/м; $b_5 = 6$ Н·с/м; $f_{\text{тр14}} = 3$ Н; $f_{\text{тр24}} = 10$ Н; $f_{\text{тр34}} = 4$ Н; $f_{\text{тр45}} = 5$ Н. Магнитопровод выполнен из электротехнической стали марки 1212. Боек - из конструкционной стали 40 ХН. Катушка прямого хода с количеством витков $w_1 = 1290$ и активным сопротивлением $r_1 = 12,9$ Ом. Катушка обратного хода с количеством витков $w_2 = 1540$ и активным сопротивлением $r_2 = 23,2$ Ом. Действующее значение напряжения источника $U = 220$ В.

Учет составляющих тока потерь $i_{\text{п1}}$ и $i_{\text{п2}}$ произведен в соответствии с рекомендациями [25, 26].

В таблице приведена оценка адекватности математической модели производилась путем сравнения расчетных значений показателей энергии удара – $A_{\text{уд}}$, действующего значения тока – I , потребляемой – P_1 и полезной – P_2 мощности, к.п.д. и $\cos \phi$ с показателями, полученными на физической модели.

Сравнение результатов моделирования

| Значения показателя | $A_{\text{уд}}$, Дж | I , А | P_1 , Вт | P_2 , Вт | к.п.д., % | $\cos \phi$ |
|---------------------|----------------------|---------|------------|------------|-----------|-------------|
| Расчет | 6,4 | 4,5 | 820 | 320 | 39 | 0,42 |
| Эксперимент | 6,2 | 4,6 | 837 | 310 | 37 | 0,39 |

Расхождение между результатами расчетов и экспериментальными данными составляет не более 4...8 %, что позволяет сделать вывод об адекватности модели. Относительно хорошее соответствие количественных результатов существенным образом зависит от точности учета аналогов механических характеристики модели и в особенности это касается демпфирующих свойств упругих связей и сил сухого трения скольжения, которыми для упрощения анализа большинство разработчиков игнорируют.

Выводы

Создана математическая модель динамики двухкатушечной СЭМУД с инерционным реверсом бойка, обеспечивающая широкие возможности для всестороннего анализа электромеханических процессов при возбуждении периодических ударных импульсов сил и взаимодействии с деформируемой средой. Достоинством модели является возможность учета большого числа взаимосвязанных факторов, зависящих от скорости бойка и частоты ударных импульсов сил, степени подвижности инерционных масс и свойств упругих связей механической системы, нелинейности характеристик магнитных материалов, сопровождаемые различного рода потерями энергии.

Методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink рассмотрен пример численной реализации модели. Максимальное расхождение между результатами численных расчетов модели и экспериментальными данными не превышает 8 %.

Список литературы

1. Ряшенцев Н.П. Электромагнитный привод линейных машин / Н.П. Ряшенцев, В.Н. Ряшенцев. – Новосибирск: Наука. – 1985. – 153 с.
2. Угаров Г.Г. Анализ показателей электромагнитных ударных машин / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1996. – № 2. – С. 72 – 80.
3. Прессовое оборудование с линейным электромагнитным приводом для механизации технологических процессов ударной сборки и штамповки мелких изделий / В.А. Аксютин, Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников. // Актуальные проблемы в машиностроении. Изд-во: Новосибирский государственный технический университет. – 2015. – № 2. – С. 220 – 225.
4. Нейман В.Ю. Режимы форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2003. – № 1. – С. 105 – 112.
5. Нейман В.Ю. Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей / В.Ю. Нейман, А.А. Петрова // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47а – 50.
6. Нейман В.Ю. Интегрированные линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий // Электротехника. – 2003. – № 9. – С. 25 – 30.
7. Малинин Л.И. Предельные силовые характеристики электромагнитных двигателей постоянного тока / Л.И. Малинин, В.Ю. Нейман // Электротехника. – 2009. – № 12. – С. 61 – 67.
8. Мошкин В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели / В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – 220 с.
9. Нейман Л.А. Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109 – 110.
10. Нейман Л.А. Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 45 – 49.
11. Нейман Л.А. Новые конструктивные решения проблемы точной синхронизации возвратно-поступательного движения бойка неуправляемой электромагнитной машины ударного действия / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 280 – 285.
12. Нейман В.Ю. Оценка конструктивного совершенства систем принудительного охлаждения синхронных электромагнитных машин ударного действия / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Журнал Сибирского Федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2015. – Т. 8. – № 2. – С. 166 – 175.
13. Нейман В.Ю. Тенденции в развитии конструкций синхронных двухобмоточных электромагнитных машин для импульсных технологий / В.Ю. Нейман, А.А. Скотников, Л.А. Нейман // Актуальные про

- блемы энергетики АПК: материалы II междунар. науч.-практ. конф. – Саратов: ФГОУ ВПО Саратовский ГАУ. – 2011. – С. 271 – 277.
14. Нейман Л.А. Повышение точности аналитического расчета радиальных сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных элементов магнитопровода / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 1 (58). – С. 246 – 256.
15. Нейман Л.А. Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (97). – С. 214 – 218.
16. Нейман В.Ю. Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // Автоматизированные электромеханические системы: [сб. науч. тр.]. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177 – 187.
17. Нейман Л.А. К оценке выбора типа электромагнита по значению конструктивного фактора / Л.А. Нейман, А.А. Петрова, В.Ю. Нейман // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 62 – 64.
18. Нейман Л.А. Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 6. – С. 35 – 40.
19. Нейман Л. А. Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка / Л. А. Нейман, В. Ю. Нейман // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. - 2016. – № 5. – С. 32 – 40.
20. Нейман Л.А. Математическая модель динамики однокатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с двухсторонним выбегом бойка / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. - № 3 (32). - С. 98–114.
21. Нейман Л.А. Динамическая модель электромагнитного привода колебательного движения для систем генерирования низкочастотных вибраций / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 3(28). – С. 75 – 87.
22. Нейман Л.А. Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник МЭИ. – 2016. – № 6. – С. 64 – 71.
23. Нейман Л. А. Математическая модель динамики электромагнитного ударного узла с упругими связями / Л. А. Нейман, В. Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2016. - № 2 (31). - С. 94 – 107.
24. Neyman V.Yu. Calculation of efficiency of DC electromagnet for mechanotronic systems / V.Yu. Neyman., L.A. Neyman, A.A. Petrova // IFOST 2008: Proceedings of the 3d International Forum on Strategic Technology, June 23–29, 2008, Novosibirsk, Tomsk. – P. 452 – 454.
25. Нейман Л.А. Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 154 – 162.
26. Нейман Л.А. Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19. – № 1. – С. 73 – 78

**SOLVING THE EQUATIONS OF THE DYNAMICS OF THE WORKING PROCESS OF AN
ELECTROMAGNETIC SHOCK MACHINE WITH THE INERTIAL
REVERSION OF BOIKE**

Neyman L.A., cand. tech. in Science, Associate Professor, e – mail: neyman31@gmail.com

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect Karl Marx, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

A mathematical model is developed for the dynamics of an electromagnetic shock unit, a two-coil synchronous electromagnetic machine with an inertial reversal of a striker, which includes a multimass oscillatory system with elastic connections and receives power from a single-phase voltage source of industrial frequency over a one-half-cycle rectification scheme. The basis of the model is the differential equations describing the electrical equilibrium of the nonlinear system and the mechanical interaction of the translationally moving masses, obtained with the help of the Lagrange equation of the second kind. The methods and means of structural modeling in Matlab Simulink considered an example of the numerical implementation of a shock-junction model with energy losses.

Keywords: impact unit, synchronous electromagnetic machine, mathematical model, mechanical oscillatory system, spring linkages, head inertial reverse, Lagrange equation of the second kind, analysis of work processes.

УДК 621.075: 629.3

РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ШКВОРНЕВОГО УЗЛА АВТОМОБИЛЯ УАЗ С ПОДШИПНИКОМ КАЧЕНИЯ

*Фирсов А. М.¹, канд. техн. наук, доцент,
Овчаренко А. Г.¹, доктор техн. наук, профессор,
Карагужин Х. Г.², директор ООО «СТО 22»,
Смирнов В. В.¹, канд. техн. наук, доцент
(¹БТИ (филиал) АлтГТУ, г. Бийск, Россия; ²ООО «СТО 22», г. Бийск, Россия)*

Фирсов А.М. – 659305, Бийск, ул. Трофимова, 27,
Бийский технологический институт Алтайского
государственного технического университета,
e – mail: tmk@bti.secna.ru

Аннотация

Для улучшения управляемости автомобилем УАЗ в конструкции узла вместо подшипника скольжения, возможно, использование подшипника качения. Такая модернизация улучшает управляемость автомобилем. Приведены результаты анализа конструкции шкворневого узла поворотного кулака автомобиля УАЗ при использовании подшипника качения. Показано, что при существующей конструкции анализируемого узла невозможно обеспечить технические требования по монтажу подшипника качения и, как следствие, обеспечить длительный срок службы.

Ключевые слова: автомобиль УАЗ, поворотный кулак, шкворневой узел, модернизация, подшипник качения, размерный анализ, технические требования, ресурс.

Введение

Автомобиль УАЗ можно считать лучшим внедорожником, из тех, что производятся в России и для российских же дорог. История выпуска этих автомобилей началась с 1953 года, когда на Горьковском автомобильном заводе сошел с конвейера ГАЗ – 69, который выпускался до 1972 года. В 1973 году на Ульяновском автозаводе начался выпуск УАЗ – 469. Версия автомобиля для использования на дорогах всех типов называлась УАЗ-469Б. В 1985 году эта «гражданская» модель была модернизирована и в дальнейшем выпускалась под названием УАЗ – 3151. Согласно официальной индексации, применяемой заводом, современный Hunter не что иное, как обновленная версия именно этой модели. Серийное производство новой модели УАЗ-315195 «Hunter» началось на заводе в Ульяновске в 2003 году. С 2005 года на Ульяновском автозаводе началось производство первой принципиально новой модели внедорожника повышенной проходимости – УАЗ Патриот 4x4 [1]. Это автомобиль имеет рамную конструкцию и зависимые мосты. Применение зависимого переднего моста с управляемыми колесами, подключаемым приводом определяет наличие в конструкции подвески поворотного кулака и шкворневого узла, конструкция последнего определяет важный эксплуатационный показатель - управляемость автомобиля. Однако многие владельцы автомобиля и эксперты отмечают недостатки в управлении автомобилем на больших скоростях, что проявляется в нечеткости управления или, как говорят, отсутствие «остроты руля». Чтобы исправить этот недостаток ряд производителей запчастей предлагают модернизацию шкворневого узла путем замены полусферического подшипника скольжения на радиально-упорный подшипник качения [2 – 5]. Многие зарубежные и отечественные производители автомобилей применяют в шкворневом узле подшипники каче-

ния. При этом следует отметить, что подшипники, во всех этих случаях, предусмотрены конструкцией и установлены заводом изготовителем с учетом условий эксплуатации автомобиля. В предлагаемой модернизации подшипник качения устанавливается в существующую конструкцию и насколько это правомерно следует разобраться, хотя бы с точки зрения технических требований по монтажу подшипников качения.

Описание исследований

Шкворневой узел входит в конструкцию поворотного кулака автомобиля, на рис. 1 представлена существующая конструкция поворотного кулака современного автомобиля УАЗ. Шкворневой узел состоит из двух шкворней 4 с полусферической, конической и резьбовой поверхностями, полусферических вкладышей 5, которые устанавливаются в опоры шкворня 8. Опоры шкворня устанавливаются в отверстия шаровой опоры поворотного кулака (ШОПК) 7 и фиксируются при помощи сварки. Корпус поворотного кулака 2 соединен с ШОПК через шкворни, которые соединены с корпусом поворотного кулака жестко за счет конических поверхностей шкворня и резьбовой зажимной втулки 3. С ШОПК шкворень взаимодействует через полусферическую поверхность шкворня и полусферический вкладыш. Такая конструкция позволяет поворачиваться корпусу поворотного кулака совместно с цапфой ступицы переднего колеса вокруг оси шкворней и обеспечивать управление автомобилем. Применение полусферических опор позволяет обеспечить самоустановку корпуса поворотного кулака относительно ШОПК и компенсировать несоосность полусферических поверхностей верхнего и нижнего шкворня.

Предлагаемая модернизация существующей конструкции корпуса поворотного кулака ШОПК и способа соединения шкворня с корпусом предусматривает замену полусферических поверхностей шкворня и опоры шкворня на цилиндрические, на которые будет установлен радиально – упорный конический подшипник качения, например, 7203 или другой с аналогичными размерами. Эта модернизация шкворневого узла представлена на рисунке 2 и, по мнению авторов, обеспечит легкость управления автомобилем УАЗ.

В технических требованиях на монтаж подшипников качения имеется требование, которое регламентирует допустимый угол взаимного перекоса между осями внутреннего и наружного колец подшипников качения. В качестве допустимого принимается наибольший угол взаимного перекоса колец подшипников, смонтированных в подшипниковых узлах, при котором долговечность сохраняется не ниже расчетной. Перекос колец является одной из причин концентрации контактных напряжений и первоначального преждевременного повреждения подшипников. Для радиально – упорных конических подшипников без модифицированного профиля допустимый угол (Θ_{\max}) перекоса осей колец составляет две минуты. Эксплуатационный угол перекоса осей Θ должен составлять $0,7 \Theta_{\max}$ [6].

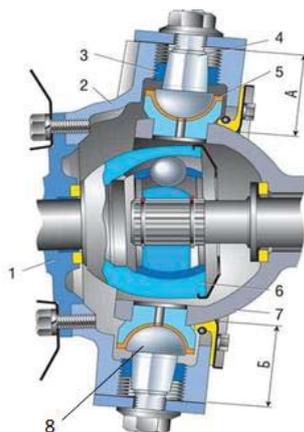


Рис. 1. Существующая конструкция поворотного кулака автомобиля УАЗ:
1 – фланец цапфы ступицы колеса; 2 – корпус поворотного кулака; 3 – зажимная резьбовая втулка;
4 – шкворень; 5 – полусферический вкладыш;
6 – ШРУС; 7 – шаровая опора поворотного кулака; 8 – опора шкворня

Перекося осей колец подшипников может возникнуть из-за отклонения от соосности, вызванное погрешностями обработки и сборки деталей, входящих в узел. В данном случае на перекося осей колец подшипников будет влиять отклонение от соосности оси цилиндрической шейки шкворня, которая является опорной поверхностью внутреннего кольца подшипника в верхней опоре относительно такой же оси в нижней опоре. Эта отклонение от соосности приведет к тому, что корпус поворотного кулака вместе со шкворнями и с установленными на них внутренними кольцами подшипника повернется относительно опор для наружного кольца подшипника на некоторый угол, который и будет углом перекося Θ .

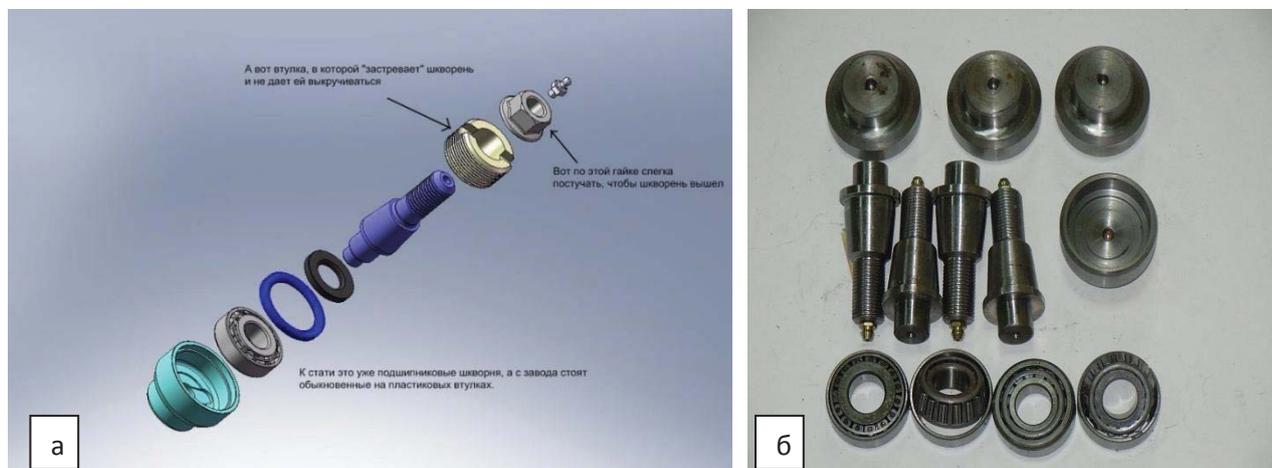


Рис. 2. Модернизации шкворневого узла автомобиля УАЗ:
а – схема модернизации шкворневого узла; б – набор для модернизации

Для определения величины отклонения от соосности в зависимости от эксплуатационного угла перекося Θ рассмотрим упрощенную расчетную схему, приведенную на рис. 3, где L – расстояние между опорами; Δ_1 , Δ_2 – отклонение от соосности поверхностей деталей, входящих в узел и определяющих положение оси шейки под установку внутреннего кольца подшипника, соответственно в

верхней и нижней опорах. Отклонение от соосности Δ_1 и Δ_2 в верхней и нижней опорах будет зависеть от точности обработки деталей, входящих в узел и радиального зазора в подшипниках. Суммарное отклонение от соосности Δ_1 и Δ_2 в зависимости от эксплуатационного угла перекоса Θ можно приближенно определить из прямоугольного треугольника через $\text{tg } \Theta$, по формуле:

$$(\Delta_1 + \Delta_2) = L * \text{tg } \Theta \quad (1)$$

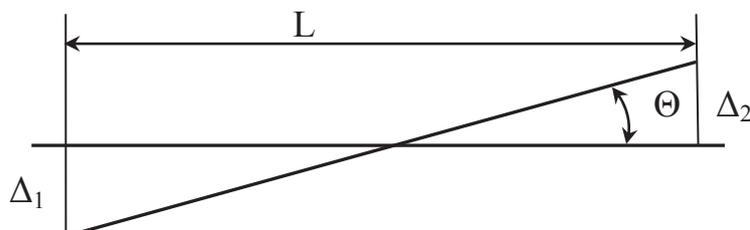


Рис. 3. Расчетная схема для определения отклонения от соосности в зависимости от эксплуатационного угла перекоса Θ

При эксплуатационном угле перекоса $\Theta = 0,7\Theta_{\max}$, что составит 1,4 минуты и расстоянии между опорами шкворня около 175 мм допустимое суммарное отклонение от соосности оси шейки шкворня под посадку внутреннего кольца подшипника в верхней опоре относительно оси шейки шкворня в нижней опоре составит около 0,07 мм.

Для определения действительной величины отклонения от соосности составим размерную цепь и решим ее методом полной взаимозаменяемости [7]. Схема размерной цепи, при помощи которой возможно определить отклонение от соосности представлена на рисунке 4. Цифрами обозначены оси поверхностей деталей: 1 и 1¹ – оси верхнего и нижнего резьбовых отверстий в корпусе поворотного кулака; 2 и 2¹ – оси резьбовых поверхностей зажимных втулок; 3 и 3¹ – оси конических поверхностей зажимных втулок; 4 и 4¹ – оси конических поверхностей шкворней; 5 и 5¹ – оси цилиндрических шеек шкворня под установку внутренних колец подшипника. Буквами с индексами $A_1 - A_9$ обозначены звенья размерной цепи. A_1 – отклонение от соосности оси верхнего резьбового отверстия относительно оси нижнего отверстия в корпусе поворотного кулака. A_2 и A_6 – отклонение от соосности осей резьбовых поверхностей в корпусе поворотного кулака относительно осей резьбовых поверхностей зажимных втулок; A_3 и A_7 – отклонение от соосности осей резьбовой поверхности зажимных втулок относительно конической поверхности этих же втулок; A_4 и A_8 – отклонение от соосности осей конических поверхностей резьбовых втулок относительно осей конических поверхностей шкворней; A_5 и A_9 – отклонение от соосности конических поверхностей шкворней относительно осей цилиндрических поверхностей шкворня под установку внутреннего кольца подшипника. A_{Δ} – замыкающее звено, которое характеризует отклонение от соосности оси цилиндрической поверхности шкворня под установку внутреннего кольца подшипника в верхней опоре относительно такой же оси в нижней опоре. В этой размерной цепи не учтены точность изготовления деталей подшипников (эксцентриситеты колец подшипников) и зазоры в подшипниках. Так как отклонения звеньев размерной цепи на чертежах не оговорены, то они приняты в соответствии с требованиями [8] и приведены в таблице.

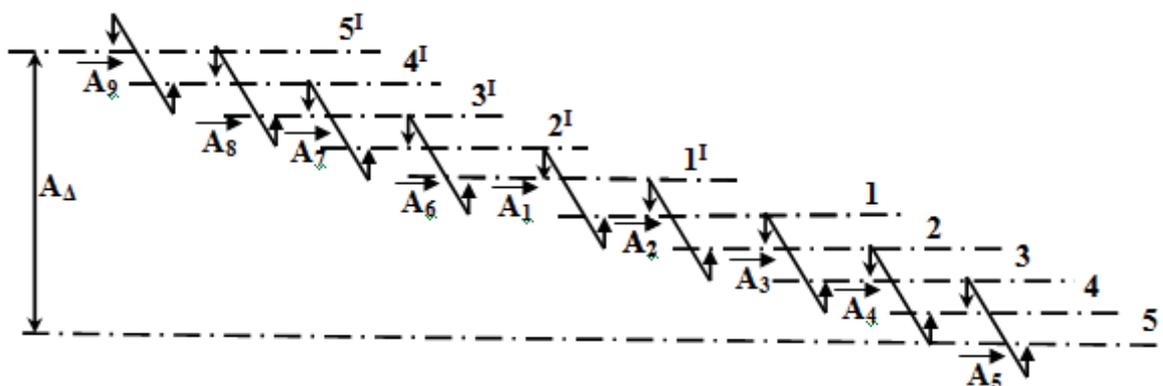


Рис. 4. Схема размерной цепи для определения отклонения от соосности осей опорных шеек шкворней под внутренние кольца подшипника относительно друг друга

Отклонения звеньев размерной цепи

| Звено | A_1 | A_2, A_6 | A_3, A_7 | A_4, A_8 | A_5, A_9 | A_{Δ} |
|-----------------------------|--------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| Класс точности | Точный | Точный | Точный | Точный | Точный | |
| Отклонение от соосности, мм | 0,12 | 0 | 0,12 | 0 | 0,1 | 0,68 |

Отклонение от соосности звена A_1 определяется в зависимости от размера резьбы М36х2. Для звеньев A_2 и A_6 отклонение от соосности равно нулю, так как при сборке обеспечивается плотное сопряжение резьбовой поверхности корпуса поворотного кулака и резьбовой поверхности зажимной втулки. Отклонение звеньев A_3 и A_7 определяется исходя из наибольшего размера, которым являет

ся резьба М36х2. Для звеньев A_4 и A_8 отклонение принято равным нулю, так как при сборке создается плотный контакт конических поверхностей зажимной втулки и шкворня. Отклонение звеньев A_5 и A_9 определяется в зависимости от размера конической поверхности шкворня. Отклонение замыкающего звена A_{Δ} определяется как сумма отклонений составляющих звеньев:

$$A_{\Delta} = \sum A_i = A_1 + A_2 + \dots + A_9 = 0,68 \text{ мм} \quad (2)$$

Как видно отклонение от соосности оси цилиндрической поверхности шкворня под посадку внутреннего кольца подшипника в верхней опоре относительно оси в нижней опоре значительно превышают допустимое отклонение, которое равно 0,07мм, согласно расчету по формуле 1. Приведенный расчет показывает, что при применении подшипника качения в существующей конструкции шкворневого узла сложно обеспечить технические требования по монтажу подшипника. Следовательно, при эксплуатации шкворневого узла с подшипниками качения возможно значительное снижение его срока службы.

Определим вероятность в процентах модернизированных шкворневых узлов, которые будут удовлетворять техническим требованиям по монтажу, для этого воспользуемся методикой, изложенной в работе [9]. Для упрощения примем, что вероятность распределения отклонений от соосности подчиняется нормальному закону. В этом случае поле распределение отклонений от соосности будет равно 6σ и равно 0,68 мм (рис. 5). Допустимая величина отклонений от соосности $\Delta_{\text{доп}}$ будет равна

0,07 мм. Вначале определим нормированный параметр распределения или коэффициент риска t по формуле:

$$t = X_0/\sigma, \quad (3)$$

где X_0 – координата крайнего положения поля допуска, равно 0,035 мм; σ – среднее квадратическое отклонение, в нашем случае равно $0,68/6 = 0,113$.

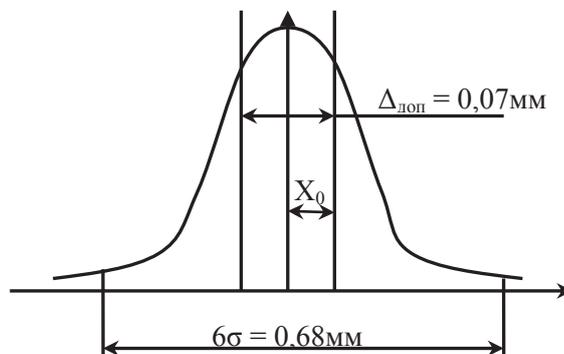


Рис. 5. Схема для определения вероятного процента модернизированных шкворневых узлов, удовлетворяющих техническим требованиям по монтажу

Затем по таблице из источника [9] в зависимости от коэффициента риска t находим функцию Лапласа $\Phi(t)$, которая и позволяет определить количество собранных модернизированных узлов, удовлетворяющих техническому требованию по монтажу. В нашем случае принимаем коэффициент риска $t = 0,31$, тогда функция Лапласа $\Phi(t)$ равна 0,1217. Следовательно, умножая это число на 100 % и на 2, так функция $\Phi(t)$ определяется от половины поля распределения, получаем, что только 24,34 % собранных модернизированных узлов будут отвечать техническим требованиям по монтажу.

Результаты и обсуждение

При использовании подшипника качения, возможно, повысится управляемость автомобилем УАЗ. Однако проведенный размерный анализ конструкции модернизированного шкворневого узла показал, что при монтаже подшипника качения в существующую конструкцию шкворневого узла не удастся полностью обеспечить техническое требование по монтажу подшипника в виде допустимого перекоса осей колец подшипника. В результате чего, только у 24,34% собранных модернизированных узлов будет обеспечиваться это требование. Следовательно, модернизируемый шкворневой узел с подшипником качения не обеспечит стабильный ресурс работы поворотного кулака.

Выводы

1. Для улучшения управляемости автомобилем УАЗ ряд производителей запчастей предлагают модернизацию шкворневого узла поворотного кулака путем замены подшипника скольжения на подшипник качения.
2. При применении подшипников качения необходимо обеспечить расчетное значение долговечности, которое в значительной мере зависит от соблюдения технических требований по монтажу.
3. Размерный анализ шкворневого узла с подшипником качения показал, что предлагаемая модернизация узла не обеспечивает требуемых условий монтажа по перекосу осей колец подшипника.

4. Используя методику теории вероятности, было установлено, что только часть модернизированных узлов (менее 25 %) обеспечат расчетное значение долговечности. У остальных узлов ресурс работы поворотного кулака будет снижен.
5. Таким образом, замена в шкворневом узле подшипника скольжения на подшипник качения без существенного изменения конструкции деталей поворотного кулака нецелесообразна.

Список литературы

1. <http://www.avtorem.info/avtoistorija/istoriya-sozdaniya-i-razvitiya-avtomobilej-uaz.html>.
2. <http://faktor-ul.ru/products.html>.
3. <http://www.otad.ru>.
4. <http://www.avtogidravlika.su>.
5. <http://www.autoopt.ru/articles/products/23354827/>
6. ГОСТ 3325-85 Подшипники качения. Поля допусков и технические требования к посадочным поверхностям валов и корпусов. Посадки. – М.: Издательство стандартов, 1985 – 40 с.
7. Белкин И.М. Допуски и посадки (Основные нормы взаимозаменяемости): Учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 1992. – 528 с.
8. ГОСТ 25069-81 Неуказанные допуски формы и расположения поверхностей. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 18 с.
9. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 496 с.

DIMENSIONAL ANALYSIS OF UAZ PIVOT SITE WITH THE ROLLING BEARING

Firsov A.M.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e – mail: firsov.am@yandex.ru

Ovcharenko A.G.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: tmk@bti.secna.ru

Karagujn H.G.², Director of "STO 22", e – mail: tmk@bti.secna.ru

Smirnov V.B.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e – mail: tmk@bti.secna.ru

¹Biysk Technological Institute, Trofimova str. 27, Biysk, 659305, Russian Federation

²"STO 22", Dalnaya str. 66, Biysk, 659330, Russian Federation

Abstract

To improve handling of the car UAZ in the design of the pivot site instead of sliding bearing the use of a rolling bearing is offered. This upgrade improves the handling of the car. The results of the analysis of the structure of the pivot to the knuckle of the UAZ with the use of a rolling bearing are given. It is shown, that at existing structure of the analyzed node, it is impossible to provide the technical requirements for installation of a rolling bearing and, as a consequence, to ensure long service life.

Keywords: car UAZ, steering knuckle, pivot site, modernization, rolling bearing, dimensional analysis, technical requirements, resource.

УДК 621.9.047

АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВА КНТ – 16 В СРЕДЕ НЕЙТРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

*КРАСИЛЬНИКОВ Б. А., канд. техн. наук, профессор,
ВАСИЛЕВСКАЯ С. И., ассистент,
ГОЛОВКО Н. В., магистрант
(НГТУ г. Новосибирск, Россия)*

Головко Н.В. – 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: nikolaigolovko@gmail.com

Аннотация

Рассматриваются особенности электрохимического растворения безвольфрамового твердого сплава КНТ – 16 в растворе нейтральных солей NaNO_3 , Na_2SO_4 . Приведены поляризационные исследования электрохимического растворения сплава КНТ – 16 при потенциодинамическом и потенциостатическом режимах. Представлена схема установки для проведения экспериментальных исследований. В ходе исследований выявлено, что растворение сплава КНТ – 16 в 5 % водном растворе нитрата натрия NaNO_3 в интервале потенциалов от $\varphi = 1,5$ В до $\varphi = 8$ В процесс проходит в активном режиме. Показано, что в 5 % водном растворе сульфата натрия в диапазоне от 2,6 В до 8 В происходит торможение активного растворения поверхности материала переходящее в пассивацию поверхности электрода, о чем свидетельствует снижение роста плотности тока.

Ключевые слова: электрохимическое растворение, электрофизикохимические технологии, твердые сплавы.

Введение

Безвольфрамовые твердые спеченные сплавы (БВТС) появились еще в начале 30 – х годов прошлого века, однако получили признание только во второй половине XX века в связи с дефицитом вольфрама во всем мире. Использование безвольфрамовых твердых сплавов в качестве инструмента является одним из путей сокращения применения вольфрамосодержащего сырья.

Проведенные исследования показали, что в качестве заменителя карбида вольфрама можно использовать либо карбиды металлов IV – VI групп периодической системы, либо другие твердые тугоплавкие соединения (нитриды, бориды, силициды) этих металлов [1]. Несмотря на то, что инструменты из этих сплавов начали широко внедряться в основном в металлообрабатывающие отрасли, БВТС нашли также дальнейшее применение среди антифрикционных материалов, а именно в условиях работы пар трения.

Сплавы типа КНТ характеризуется высокой окалиностойкостью, термостойкостью, пониженным, коэффициентом трения по стали. Коэффициент трения КНТ в 8 – 10 раз меньше, чем у сплавов WC-Co. Оптимальным по свойствам из исследованных сплавов КНТ оказался сплав КНТ – 16 [2, 3].

Ввиду особых характеристик БВТС возникают определенные трудности при последующей механической обработке. Применение лезвийной обработки практически невозможно из – за высокой твердости обрабатываемого материала. При использовании абразивных методов в зоне обработки возникают значительные по величине режущие силы, что приводит к появлению высоких локальных температур и, как следствие, образованию поверхностных дефектов в виде прижогов [4, 5]. Наличие

таких факторов приводит к существенному снижению производительности процесса обработки и качества поверхностного слоя. Одним из прогрессивных методов обработки высокопрочных материалов является комбинированное с электрохимической размерной обработкой электроалмазное шлифование, которое хорошо зарекомендовало себя при обработке твердых сплавов и быстрорежущих сталей, благодаря совмещению процессов электрохимического растворения обрабатываемого материала с механическим обновлением поверхности алмазными зернами инструмента. Таким образом, достигается высокая точность и производительность обработки. Производительность процесса обработки и качество обработанной поверхности во многом зависят от особенностей электрохимического растворения сплава в выбранных составах электролитов. В виду этого для эффективного применения данного метода обработки безвольфрамового твердого сплава КН – 16 необходимо изучить характер электрохимического растворения покрытия в различных составах электролита.

Методика экспериментальных исследований

Для определения характера электрохимического растворения сплава КНТ – 16 применялся потенциодинамический метод исследования, позволяющий установить зависимость плотности тока от потенциала анода.

Основываясь на предыдущих исследованиях электрохимическая обработка твердых сплавов производится при напряжениях 8 – 12 В [6], то и развертка потенциала производилась от 0 до 8 В. Электрохимическая ячейка для исследований представлена на рис. 1.

Исследования проводились в неподвижном электролите потенциодинамическим методом при помощи потенциостата Elins P – 20X и трехэлектродной электрохимической ячейки с платиновым электродом сравнения и медным вспомогательным электродом.

Предварительно зачищенный образец устанавливался в электрохимическую ячейку с выдерживанием зазора 0,1 мм между рабочим электродом и электродом сравнения. Скорость развертки $\varphi = 0,1$ В/с. Площадь образца составляла $S = 0,009$ см². Образцы устанавливались в эбонитовые оправки и заливались эпоксидной смолой ЭДП – 8 ГОСТ 10587 – 84. Химический состав сплава КНТ – 16 представлен в таблице.

Универсальных электролитов для электрохимической обработки не существует, поэтому при подборе состава электролита приходится в первую очередь учитывать те требования, которые являются определяющими для выполнения данной обработки. Для увеличения скорости растворения берут электролиты с большей удельной проводимостью, а для повышения точности лучше использовать электролит с пониженной проводимостью. Для каждого электролита удельная проводимость может быть самой различной в зависимости от его состава, концентрации, температуры. В связи с этим были выбраны наиболее распространенные растворы нейтральных солей: NaNO_3 и Na_2SO_4 5 % концентрации

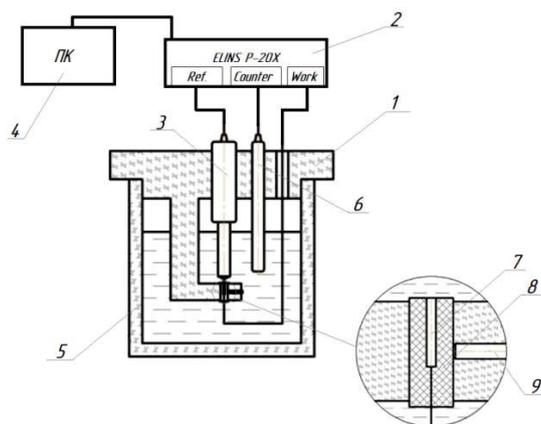


Рис. 1. Схема комплекса для проведения поляризационных исследований
1 — крышка; 2 — потенциостат Elins P – 20X; 3 — электрод сравнения (Ref.);
4 — регистратор данных; 5 — емкость для электролита;
6 — вспомогательный электрод (Counter); 7 — рабочий электрод (Work);
8 — эбонитовая оправка; 9 — крепежный винт

Химический состав сплава КНТ – 1 6

| Марка твердого сплава | TiCN, % | Mo, % | Ni, % |
|-----------------------|---------|-------|-------|
| КНТ-16 | 74 | 6,5 | 19,5 |

Результаты и обсуждения

На рис. 2 и 3 представлены кривые при потенциодинамическом режиме поляризационных исследований электрохимического растворения сплава КНТ – 16 в водных растворах 5 % Na₂SO₄, 5 % NaNO₃.

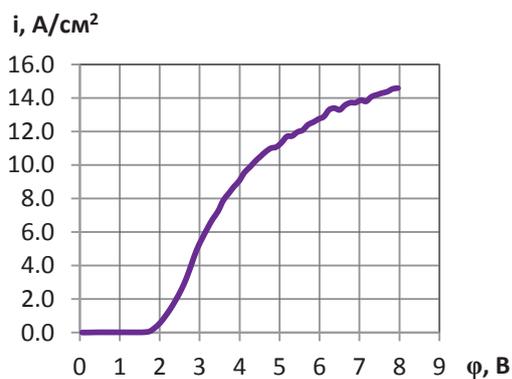


Рис. 2. Анодные поляризационные кривые электрохимического растворения безвольфрамового твердого сплава КНТ – 16 в 5 % водном растворе NaNO₃

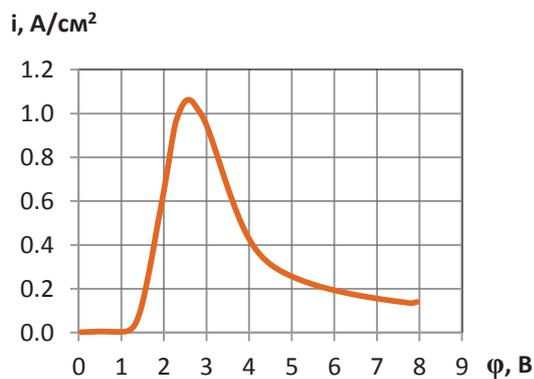


Рис. 3. Анодные поляризационные кривые электрохимического растворения безвольфрамового твердого сплава КНТ – 16 в 5 % водном растворе Na₂SO₄

Электрохимическое растворение сплава КНТ – 16 в 5 % водном растворе нитрата натрия NaNO_3 (рис. 2) происходит активное травление поверхности рабочего электрода в диапазоне потенциалов от $\varphi = 1,5$ В до $\varphi = 8$ В. До потенциала $\varphi = 1,5$ В электрохимическое растворение практически не наблюдается.

В 5 % водном растворе сульфата натрия в области потенциалов 0 В – 1,2 В плотность тока близка к нулю, а в области потенциалов от 1,2 В до 2,6 В происходит резкое возрастание плотности тока, однако в диапазоне от 2,6 В до 8 В происходит торможение активного растворения поверхности материала переходящее в пассивацию поверхности электрода, о чем свидетельствует снижение роста плотности тока.

При электрохимической обработке активирующие электролиты приводят к понижению точности, т.к. при этом растравление поверхности будет происходить не только в зоне обработки, но и во всех местах контакта электролита и материала [7].

Основываясь на графиках электрохимического растворения в водных растворах солей сульфата и нитрата натрия, для процесса электрохимической обработки рекомендуется 5 % водный раствор Na_2SO_4 . Для оценки локализирующей способности [8] электролитов были проведены потенциостатические исследования, в которых снимались токи включения с обновлением поверхности и шагом измерения 0,5 В, которые показали (рис. 4), что при 7 В соотношение плотностей токов $\gamma = i_{cm}/i_{дин}$ при потенциостатическом ($i_{cm} = 6,8 \text{ А/см}^2$) и потенциодинамическом ($i_{дин} = 0,16 \text{ А/см}^2$) режиме составляет $\gamma = 42,5$, что говорит о высокой локализации процесса.

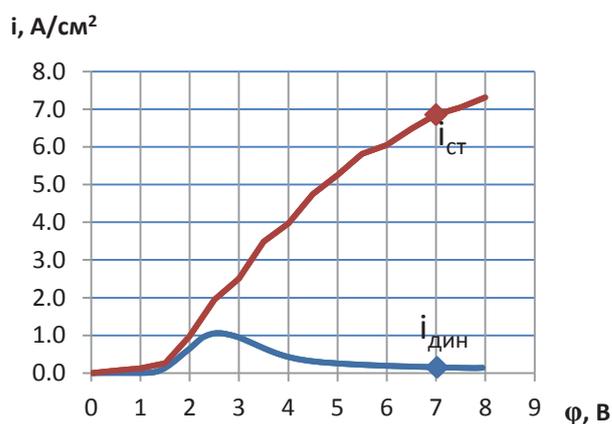


Рис. 4. Анодные поляризационные кривые электрохимического растворения безвольфрамового твердого сплава КНТ – 16 в 5 % водном растворе Na_2SO_4

Выводы

Проведенные исследования позволили выявить характер анодного растворения сплава в 5 % - м водном растворе нитрата и сульфата натрия в условиях ЭХО. При электрохимической обработке активирующие электролиты приводят к понижению точности, т.к. при этом растравление поверхности будет происходить не только в зоне обработки, но и во всех местах контакта электролита и материала. Выявлено, что при 7 В в 5% растворе Na_2SO_4 соотношение плотности тока при потенциостатическом ($i_{дин} = 0,16 \text{ А/см}^2$) и потенциодинамическом ($i_{дин} = 0,16 \text{ А/см}^2$) режиме составляет $\gamma = 42,5$, что говорит о высокой локализации процесса и о возможности повышения точности ЭХО при механической активации поверхности.

Список литературы

1. Малевский, Н. П. Особенности алмазного шлифования безвольфрамовых твердых сплавов / Н. П. Малевский, С. А. Попов, Н. С. Тарахнов // Вестн. машиностроения. – 1976. – №12. – С. 53 – 55.
2. Кудря Н.А., Залужный А.А. ГОСТ 26530 – 85 Сплавы твердые спеченные безвольфрамовые //М.–Государственный комитет СССР по стандартам. – 1985. – 7 с.
3. Панов В.С., Чувилин А.М. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них: учеб. пособие для вузов // М.–МИСИС, – 2001. – 428 с.
4. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимьянов К.Х. Точность формообразования при электроалмазной прорезке пазов в аморфных и нанокристаллических сплавах.// Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 2. – С.32 – 33.
5. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимьянов К.Х., Еремина А.С. Модернизация оборудования для электроалмазного шлифования изделий из аморфных и нанокристаллических сплавов. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – №3. – С.37 – 39.
6. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В., Красильников Д.Б. Электрохимическая обработка безвольфрамовых твердых сплавов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 3. – С. 3 – 7.
7. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В., Никитенко М.И., Моисеенко А.Н. Электрохимическое растворение покрытий из порошковых материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 2. – С. 3 – 5.
8. Рахимьянов Х. М., Красильников Б.А., Василевская С.И. Степень локализации процесса при интенсификации анодного растворения меди // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 3 (68). – С. 58 – 65. – DOI: 10.17212/1994 – 6309 – 2015 – 3 – 58 – 65.

ANODE BEHAVIOUR OF KNT – 16 ALLOY IN THE NEUTRAL ELECTROLYTES MEDIUM

Krasilnikov B.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e – mail: krasilnikov@corp.nstu.ru

Vasilevskaya S. I. Assistant, e – mail: vasilevskaya@corp.nstu.ru

Golovko N.V., Master's student, e – mail: nikolaigolovko@gmail.com

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

Features of electrochemical dissolution of KNT – 16 hard alloy in aqueous solution of neutral salts NaNO_3 , Na_2SO_4 are considered. Polarization researches of electrochemical dissolution of KNT – 16 alloy at the potentiodynamic and potentiostatic modes are presented. Test bench scheme for polarization studies are submitted. During the researches it is revealed that dissolution of KNT – 16 alloy in 5 % an aqueous solution of Sodium nitritum in the range of potentials from $\varphi = 1,5$ B to $\varphi = 8$ B undergoes process in the fissile mode. It is shown that in 5 % an aqueous solution of salt cake in the range from 2,6 B to 8 B there is a braking of the fissile dissolution of a surface of material turning into passivation process of an electrode's surface what decrease in body height of a current density testifies to.

Keywords: electrochemical dissolution, electrophysicochemical technologies, hard alloys.

УДК 621.9.06:006.82

К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ РАЗМЕРНЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМИ КОМПОНОВКАМИ

*АНИКЕЕВА О. В., канд. техн. наук., ст. науч. сотрудник
(ЮЗГУ, г. Курск, Россия)*

Аникеева О.В. – 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»,
e – mail: olesya-anikeeva@yandex.ru

Аннотация

В работе представлен научно обоснованный подход к построению системы размерных связей при обработке заготовок на станках с последовательными типами компоновок. Приведена структура геометрических погрешностей обработанной детали, выделены три слоя размерных связей. Представлены выражения, позволяющие сформировать полную систему размерных связей при обработке заготовок для слоя размерных связей формообразующей системы при выбранном станке и инструменте. Рассмотрен пример системы размерных связей для токарного станка с последовательным типом компоновки при обработке на нем торцевой и цилиндрической поверхностей.

Ключевые слова: формообразующая система, геометрическая погрешность, металлорежущий станок.

Введение

Последовательные компоновки металлорежущих станков, т.е. тех, в которых звенья формообразующей системы (ФС) соединены последовательно и имеют в относительном движении не более одной степени свободы [1], относятся к наиболее распространенным типам [2]. При этом взаимное положение двух таких звеньев в общем случае характеризуется шестью геометрическими погрешностями взаимного расположения. В целом геометрические погрешности станка оказывают значимое влияние на точность обработанных на них деталей, а их предельные значения приведены в соответствующих ГОСТах. Однако система действующих стандартов на нормы геометрической точности станков является не полной, поскольку не охватывает все уже известные компоновки станков [3], а также не содержит рекомендаций по обоснованию таких норм для станков с новыми компоновками. По мнению авторов работы [1] при нормировании точности станков формируют некоторый перечень проверок «... что позволяет как-то оценить качественный уровень изготовления станка, но часто не дает возможность рассчитать точность обработки на станке» (с. 94, [1]).

Выявление размерных связей между геометрическими погрешностями обработанных деталей и погрешностями станка является важным этапом как при создании обоснованных норм точности станков, так и при выборе оборудования для достижения требуемой точности обработки.

Основой для выявления таких связей является вариационный метод расчета точности [1], получивший дальнейшее развитие в работах [4 – 6]. В них рассмотрено образование погрешностей размера, формы и погрешности положения как отдельной обработанной поверхности относительно технологических баз, так и взаимного расположения различных обработанных поверхностей, т.к. свое служебное назначение деталь выполняет системой поверхностей [7]. Полагаем, что для некоторого станка с известной компоновкой, уже имеются результаты выполнения этапа обоснованного выбора

множества изготавливаемых на нем деталей с заданными требованиями к точности обработки каждой поверхности и их взаимного расположения. Тогда построение системы размерных связей при обработке заготовок между геометрическими погрешностями станка и обработанных на нем деталей для обоснования норм точности, является актуальным.

Целью данной работы является создание научно обоснованного подхода к построению системы размерных связей при обработке заготовок на станках с последовательными типами компоновок.

Научно обоснованный подход к построению системы размерных связей при обработке заготовок на станках с последовательными компоновками

Достижение поставленной цели требует исследования возможных вариантов структур соотношений между параметрами геометрической точности металлорежущего станка и обработанных на нем поверхностей деталей.

Структура геометрических погрешностей обработанной детали, ограничиваемых соответствующими допусками по ГОСТ 2 – 308 и др., представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структура геометрических погрешностей обработанной детали

При построении системы размерных связей при обработке заготовок целесообразно ввести три слоя:

- 1) слой размерных связей собственно самой детали (из чертежа);
- 2) слой размерных связей заготовки при принятой технологии обработки на уровне операций;
- 3) слой размерных связей ФС при выбранном станке и инструменте.

В свою очередь, слой размерных связей ФС может иметь три варианта структуры, при обработке без переустановки обрабатываемой заготовки:

1. одним режущим инструментом;
2. несколькими режущими инструментами, расположенными в одном узле ФС, например, в револьверной головке;
3. несколькими режущими инструментами, расположенными в различных узлах ФС, например, на различных суппортах.

Уравнение номинальной обрабатываемой поверхности [1] имеет вид:

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_0(u, v, \mathbf{q}_0), \quad (1)$$

где u, v – криволинейные координаты поверхности; \mathbf{q}_0 – вектор размерных параметров поверхности; $\mathbf{q}_0 = (q_{01}, \dots, q_{0m1})^T$; $m1$ – количество составляющих вектора \mathbf{q}_0 ; t – символ транспонирования.

Новые определения векторного баланса точности $\Delta \mathbf{r}_0$ и уравнения реальной обрабатываемой поверхности \mathbf{r} , данные в работе [4], включают в свой состав только те погрешности станка, которые входят в соответствующий скалярный баланс $\Delta r_n = (\mathbf{n}^T \cdot \Delta \mathbf{r}_0)$, где \mathbf{n} – единичный вектор нормали к обрабатываемой поверхности, в структурном виде представлены как:

$$\Delta r_0 = \varepsilon_0 r_0 + \delta r_0 + dr_0, \quad (2)$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \varepsilon_0 \mathbf{r}_0 + \delta \mathbf{r}_0 + d\mathbf{r}_0, \quad (3)$$

где $\varepsilon_0 = \varepsilon_i (i = 0)$, ε_i – матрица погрешности взаимного расположения S_{i-1} -ой и S_i -ой систем координат ФС, связанных с $i-1$ -м и i -м узлами ФС:

$$\varepsilon_i = \begin{pmatrix} 0 & -\gamma_i & \beta_i & \delta_{xi} \\ \gamma_i & 0 & -\alpha_i & \delta_{yi} \\ -\beta_i & \alpha_i & 0 & \delta_{zi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $\delta_{xi}, \delta_{yi}, \delta_{zi}$ – малые смещения системы координат S_i вдоль осей X, Y, Z ; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ – малые углы поворота системы координат S_i относительно осей X, Y, Z .

В работе [4] было установлено, что матрица ε_0 полностью определяет изменение положения обрабатываемой заготовки при обработке поверхности \mathbf{r}_0 относительно используемой технологической базы, из-за погрешностей формы поверхностей, служащих для установки заготовки, и приводящих к возникновению погрешности базирования. Составляющие $d\mathbf{r}_0$ и $\delta \mathbf{r}_0$ в выражениях (6) и (7), определяют погрешности размера и формы для реально обработанной поверхности.

Для нетехнологичных деталей, у которых технологические базы на рассматриваемой операции не совпадают с конструкторскими базами, относительно которых заданы погрешности расположения обрабатываемых поверхностей, в работе [5] даны зависимости для определения:

– величины угла $\eta_{1,2}$ между двумя радиусами – векторами реальных обработанных поверхностей $\mathbf{r}_1(u, v)$ и $\mathbf{r}_2(u, v)$:

$$\cos \eta_{1,2} = \frac{\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1| |\mathbf{r}_2|}, \quad (5)$$

– расстояния $\rho(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ между этими радиусами – векторами:

$$\rho(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \sqrt{(\mathbf{r}_2(1,1) - \mathbf{r}_1(1,1))^2 + (\mathbf{r}_2(2,1) - \mathbf{r}_1(2,1))^2 + (\mathbf{r}_2(3,1) - \mathbf{r}_1(3,1))^2} \quad (6)$$

При использовании зависимостей (5) и (6) можно рассматривать не только полные геометрические элементы (поверхности), но и производные геометрические элементы. В этом случае \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 будут являться функциями одной криволинейной координаты для линий, или являться константами для точек. Представленные выражения (1) - (6) позволяют сформировать полную систему размерных связей при обработке заготовок для слоя размерных связей ФС при выбранном станке и инструменте.

Пример обработки заготовки на токарном станке с последовательной компоновкой

Рассмотрим обработку цилиндрической и правой торцевой поверхностей детали (рис. 2) на токарном станке с последовательной компоновкой одним режущим инструментом за один установ, ФС которого представлена на рис. 3.

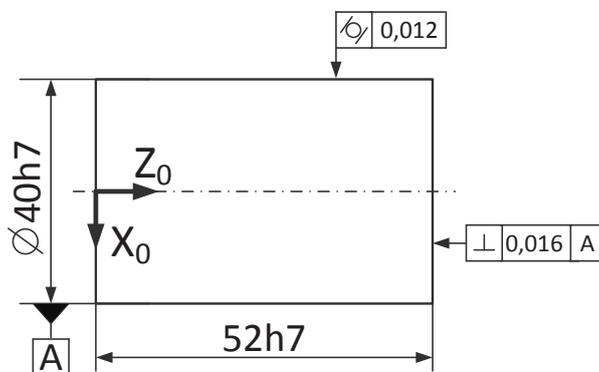


Рис 2. Обработанная деталь

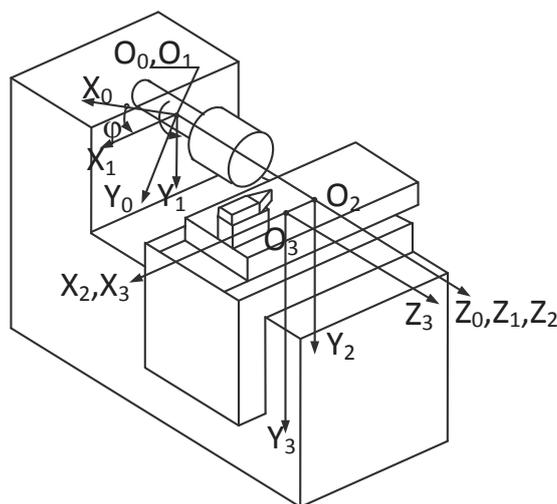


Рис 3. ФС токарного станка

Опуская промежуточные выкладки, считая, что геометрические погрешности станка не зависят от обобщенных переменных u и v , и, учитывая только члены первого порядка малости, система размерных связей будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} p(T_1 - /O/) \geq \delta x_1 + \delta x_2 + \delta x_3, \\ p/O/ \geq l\beta_1, \\ pT_2 \geq 2R(\beta_1 + \beta_2) + \delta z_1 + \delta z_2 + \delta z_3, \\ 2p \perp \geq \frac{Rl(2\beta_1 + \beta_2)}{R^2 + l^2}, \end{cases} \quad (7)$$

где p – доля геометрических погрешностей станка в погрешностях обработанной детали; T_1 и T_2 – значения полей допусков на цилиндрическую ($R = 20$ мм) и торцевую ($l = 52$ мм) поверхности, $T_1 = 25$ мкм, $T_2 = 30$ мкм; $/O/$ – допуск на отклонение от цилиндричности, $/O/ = 12$ мкм; \perp – допуск на отклонение от перпендикулярности цилиндрической и торцевой поверхностей, $\perp = 0,016/40$ рад; а остальные составляющие являются геометрическими погрешностями станка, т.е. элементами матриц ε_i по выражению (4).

Значения геометрических погрешностей станка, удовлетворяющие системе связей (7), при принятых допущениях, позволяют обеспечить заданную точность обработки детали. Полная система размерных связей должна формироваться на основе требований к точности всех деталей, обрабатываемых на станке, в т.ч. несколькими режущими инструментами, расположенными в одном узле или различных узлах ФС.

Выводы

В данной работе представлен научно обоснованный подход к построению системы размерных связей при обработке заготовок на станках с последовательными типами компоновок. Для станков с параллельными и гибридными компоновками при формализации структуры ФС используются виртуальные координаты [6, 7], при этом погрешности реальных звеньев станков являются функциями погрешностей виртуальных координат. В связи с этим, построение полной системы размерных связей для станков с различными типами компоновок требует развития предложенного подхода к определению геометрических погрешностей для станков с параллельными и гибридными компоновками.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16 – 38 – 60049 мол_а_дк.

Список литературы

1. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
2. Аверьянов О.И., Гельштейн Я.М. Информационное обеспечение проектирования металлорежущих станков: Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства. - М.: ВНИИТЭМР; вып.1, 1988. – 44 с.
3. Долженкова, С.Б. Выявление геометрических погрешностей металлорежущих станочных систем влияющих на точность обработки / С.Б. Долженкова, А.Г. Ивахненко, В.В. Куц // Известия Курского государственного технического университета. – 2010. - № 2 (31). – С. 60 – 65.

4. Аникеева, О.В. Развитие вариационного метода расчета точности металлорежущих станков / О.В. Аникеева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - № 5, 2016. – С. 111 – 118.
5. Аникеева, О.В. Влияние параметров геометрической точности станков на отклонения расположения обработанных поверхностей / О.В. Аникеева, А.Г. Ивахненко, Д.Н. Крюков // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №1 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/52TVN117.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
6. Ивахненко, А.Г. Точность формообразования на гексаподах / А.Г. Ивахненко, О.Н. Подленко // СТИН. - № 9, 2007. – С. 2 – 6.
7. Ивахненко, А.Г. Структурно-параметрический синтез металлорежущих систем с гибридной компоновкой / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц, Е.О. Ивахненко Е.О. // Вестник машиностроения. - № 5, 2016. – С. 17 – 23.

TO THE BUILDING OF THE FUNCTIONAL RELATIONSHIPS SYSTEM IN PROCESSING OF WORK PIECES ON MACHINES WITH CONSISTENT ARRANGEMENTS

Anikeeva O.V., C.Sc. (Engineering), Senior Researcher, e – mail: olesya-anikeeva@yandex.ru

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Southwest State University",
50 Let Oktyabrya Street, 94, Kursk, 305040, Russian Federation

Abstract

The scientifically advanced approach to the building of the functional relationships system in processing of work pieces on machines with consistent arrangements is considered in the paper. The basis to building of the functional relationships system is the variational method for calculating the accuracy of machine tools. The structure of the machined part geometric errors is given in the paper. Three layers of functional relationships and three variant of a machine forming system structure are allocated. The mathematical expressions are presented which allow to forming a functional relationships complete system during the machining of work pieces. This expressions can be used for a layer the dimensional relations of the machine forming system when selected the machine and the tool. The turning as an example the system functional relationships for turning machine with consistent arrangements in the processing to this end and cylindrical surfaces are considered. Direction for further studies is the building of the full functional relationships system for machine with various arrangements. This direction is requires of the development of a proposed approach to the definition of geometric errors for machine tools with parallel and hybrid arrangements.

Keywords: machine forming system, geometric accuracy, machine – tool.

УДК 539.5:621.91

**НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОТРЕЗНЫХ КРУГОВ ПРИ
СЛАБОЙ АНИЗОТРОПИИ МАТЕРИАЛА КОРПУСА**

*АВETИCOB P. A., ассистент,
EPOШИH C. C., д.т.н., профессор
(ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)*

Аветисов Р.А. – 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20 а,
ГОУ ВПО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля»,
е – mail: shemotechnik@rambler.ru

Аннотация

В работе решается плоская задача теории упругости в перемещениях для кругов АКВР, при наличии слабой прямолинейной анизотропии материала, вызванной технологическими факторами. В качестве расчетной модели взято анизотропное кольцо с прямоугольной, прямолинейной анизотропией, растягиваемое равномерным давлением по внешнему контуру. Интегрируя напряжения, представленные Лехницким С.Г. в своей монографии «Анизотропные пластинки», и используя условия периодичности и симметрии, найдено распределение всех перемещений в кольце. Исходя из норм ГОСТ 26004 – 83 на допускаемую анизотропию материала отрезного круга, даны оценки величины возможного радиального биения режущей кромки круга.

Ключевые слова: слабая анизотропия, отрезной круг, ортотропное кольцо, резка монокристаллов, задача Ламе.

Введение

Как известно, формообразование ленты производят способом холодной прокатки, что ведет к возникновению в ней анизотропии механических свойств. Последнее, в свою очередь, препятствует равномерному натяжению корпуса круга, что ухудшает качество поверхности отрезаемых пластин [1], [2]. В связи с этим встает практическая задача количественно определить влияние анизотропии корпуса на величину радиального биения отрезных кругов АКВР.

Если в теле можно провести 3 ортогональные друг к другу плоскости, по разные стороны которых упругие свойства тела остаются неизменными, то говорят о прямолинейной ортогональной анизотропии или коротко – ортотропии. Именно таким видом анизотропии обладает материал, из которого сделан отрезной круг. К тому же, допускаемая по ГОСТ 26004-83 анизотропия материала АКВР не должна превышать 7 %, таким образом, материал корпуса обладает так называемой *слабой анизотропией*. Принимая, что круг растянут равномерным давлением интенсивностью q , получаем задачу о равномерном плоском растяжении по внешнему контуру слабо анизотропного ортотропного кольца с внешним радиусом a и внутренним b (рис. 1). Эта задача имеет и самостоятельный, теоретический интерес.

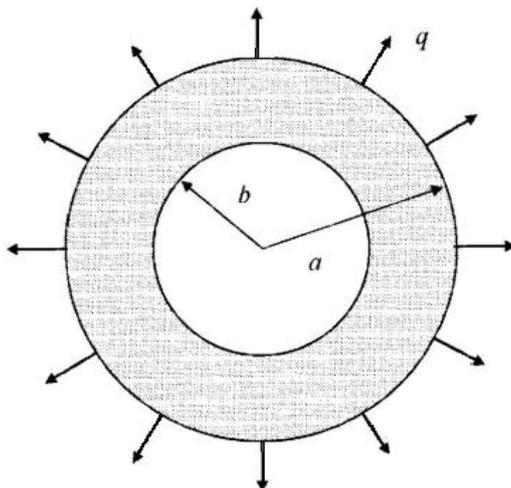


Рис. 1. Расчетная схема слабо ортотропного кольца, растянутого равномерной нагрузкой q

Описание исследований

Совместим оси прямоугольной декартовой системы координат OXY с главными осями упругости материала кольца, по которым $E_x = E_1$ и $E_y = E_2$. Введем полярную систему координат с осями e_r и e_θ , полюс которой совпадает с центром декартовой системы координат, а полярная ось совпадает с осью OX (рис. 2).

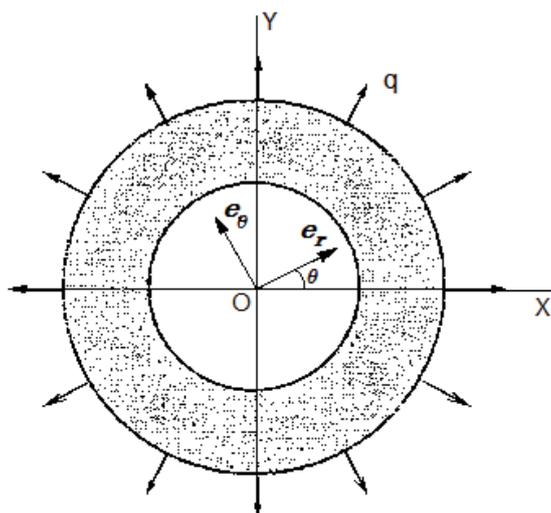


Рис. 2. Введение декартовой и полярной систем координат. Оси X и Y совпадают с главными осями ортотропии

В монографии С.Г. Лехницкого «Анизотропные пластинки» [3] автором найдены напряжения слабо анизотропного кольца с прямоугольной анизотропией, сжатого по внутреннему и внешнему

контуру равномерным внутренним p и внешним q давлениями. Принимая в формулах Лехницкого, что внутренне давление равно нулю $p = 0$, а внешнее давление – растягивающее, т.е. $q \leftarrow -q$, получим решение для рассматриваемой задачи о равномерном растяжении слабо ортотропного кольца по внешнему контуру:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{rr}(r, \theta) &= \frac{q}{1-c^2} - \frac{qc^2}{1-c^2} \left(\frac{a}{r}\right)^2 + \\ &+ \lambda_1 \lambda_2 \left[A \left(\frac{r}{a}\right)^4 + B \left(\frac{r}{a}\right)^2 + 3C \left(\frac{a}{r}\right)^4 + D \left(\frac{a}{r}\right)^6 + 2 \left(\frac{a}{r}\right)^2 \right] \frac{q \cdot c^2}{1-c^2} \cdot \cos(4\theta) \\ \sigma_{\theta\theta}(r, \theta) &= \frac{q}{1-c^2} + \frac{qc^2}{1-c^2} \left(\frac{a}{r}\right)^2 - \\ &- \lambda_1 \lambda_2 \left[3A \left(\frac{r}{a}\right)^4 + B \left(\frac{r}{a}\right)^2 + C \left(\frac{a}{r}\right)^4 + D \left(\frac{a}{r}\right)^6 \right] \frac{q \cdot c^2}{1-c^2} \cdot \cos(4\theta) \\ \tau_{r\theta}(r, \theta) &= \lambda_1 \lambda_2 \left[-2A \left(\frac{r}{a}\right)^4 - B \left(\frac{r}{a}\right)^2 + 2C \left(\frac{a}{r}\right)^4 + D \left(\frac{a}{r}\right)^6 + \frac{1}{2} \left(\frac{a}{r}\right)^2 \right] \frac{q \cdot c^2}{1-c^2} \cdot \sin(4\theta) \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где: $\lambda_1 = \frac{\mu_1}{i} - 1$, $\lambda_2 = \frac{\mu_2}{i} - 1$, $i = \sqrt{-1}$ – комплексные константы Лехницкого; θ – полярный угол (см. рис. 2).

Причем, коэффициенты μ_1 и μ_2 находятся из уравнения (2):

$$\alpha_{11} \cdot \mu^4 + (2\alpha_{12} + \alpha_{66}) \cdot \mu^2 + \alpha_{22} = 0 \quad (2)$$

где: $\alpha_{11} = \frac{1}{E_1}$, $\alpha_{22} = \frac{1}{E_2}$, $\alpha_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}$, $\alpha_{66} = \frac{1}{G_{12}}$;

E_1, E_2, G_{12} – главные модули упругости и модуль сдвига соответственно;

ν_{12}, ν_{21} – коэффициенты Пуассона в направлении главных осей упругости.

Часто для упрощения аналитических выкладок, на модуль сдвига ортотропного тела накладывают дополнительное условие, сходное с условием для изотропного тела [4], [5]:

$$G_{12} = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Где: $E = \sqrt{E_1 E_2}$, $\nu = \sqrt{\nu_{12} \nu_{21}}$.

Если ввести обозначение $k = \frac{E_1}{E_2}$, то предыдущее равенство примет вид:

$$\alpha_{66} = \frac{1}{G_{12}} = 2(\sqrt{k} + \nu_{12})\alpha_{11} \quad (3)$$

Это выражение при $k = 1$ совпадает с известным соотношением для изотропного тела. В силу слабости анизотропии, можно предполагать, что значение модуля сдвига, вычисленное по формуле (3) мало отличается от его истинного значения.

После подстановки (3) в уравнение (2), последнее упрощается и принимает вид

$$(\mu^2 + \sqrt{k})^2 = 0$$

Определив его корни $\mu_1 = \mu_2 = \mu = \sqrt{-\sqrt{k}}$, найдем коэффициенты произведения $\lambda_1 \lambda_2$:

$$\lambda_1 \lambda_2 = \left(\frac{\mu_1}{i} - 1\right) \left(\frac{\mu_2}{i} - 1\right) = (\sqrt{\sqrt{k}} - 1)^2 \quad (4)$$

Обобщенный закон Гука:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{rr} \\ \varepsilon_{\theta\theta} \\ \gamma_{r\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha'_{11} & \alpha'_{12} & \alpha'_{16} \\ \alpha'_{12} & \alpha'_{22} & \alpha'_{26} \\ \alpha'_{16} & \alpha'_{26} & \alpha'_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \tau_{r\theta} \end{pmatrix}$$

Выпишем упругие константы при повороте координат:

$$\alpha'_{11} = \alpha_{11} \cdot \cos^4 \theta + \frac{1}{4}(2\alpha_{21} + \alpha_{66}) \sin^2(2\theta) + \alpha_{22} \cdot \sin^4 \theta$$

$$\alpha'_{22} = \alpha_{11} \cdot \sin^4 \theta + \frac{1}{4}(2\alpha_{21} + \alpha_{66}) \sin^2(2\theta) + \alpha_{22} \cdot \cos^4 \theta$$

$$\alpha'_{12} = \frac{1}{4}(\alpha_{11} + \alpha_{22} - 2\alpha_{12} - \alpha_{66}) \sin^2(2\theta) + \alpha_{12}$$

$$\alpha'_{66} = (\alpha_{11} + \alpha_{22} - 2\alpha_{12} - \alpha_{66}) \sin^2(2\theta) + \alpha_{66}$$

$$\alpha'_{16} = \left(\alpha_{22} \sin^2(\theta) - \alpha_{11} \cos^2(\theta) + \frac{1}{2}(2\alpha_{21} + \alpha_{66}) \cos(2\theta) \right) \sin(2\theta)$$

$$\alpha'_{26} = \left(\alpha_{22} \cos^2(\theta) - \alpha_{11} \sin^2(\theta) - \frac{1}{2}(2\alpha_{21} + \alpha_{66}) \cos(2\theta) \right) \sin(2\theta)$$

Причем $\alpha_{21} = \alpha_{12}$.

Выполним подстановку в закон Гука упругих констант и напряжений Лехницкого:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} = & \frac{q}{1-c^2} \left[1 - \frac{b^2}{r^2} + \lambda_1 \lambda_2 c^2 \left(\frac{2a^2}{r^2} + A \frac{r^4}{a^4} + B \frac{r^2}{a^2} + C \frac{3a^4}{r^4} + D \frac{a^6}{r^6} \right) \cos(4\theta) \right] \times \\ & \times \left[\left(\frac{\alpha_{12}}{2} + \frac{\alpha_{66}}{4} \right) \sin(2\theta)^2 + \alpha_{11} \cos(\theta)^4 + k\alpha_{11} \sin(\theta)^4 \right] + \\ & + \frac{q}{1-c^2} \left[1 + \frac{b^2}{r^2} - \lambda_1 \lambda_2 c^2 \left(A \frac{3r^4}{a^4} + B \frac{r^2}{a^2} + C \frac{a^4}{r^4} + D \frac{a^6}{r^6} \right) \right] \times \\ & \times \left[\alpha_{12} - \sin(2\theta)^2 \left(\frac{\alpha_{12}}{2} - \frac{\alpha_{11}}{4} + \frac{\alpha_{66}}{4} - \frac{k\alpha_{11}}{4} \right) \right] + \\ & + \frac{q}{1-c^2} \lambda_1 \lambda_2 c^2 \sin(2\theta) \sin(4\theta) \left(\frac{a^2}{2r^2} - A \frac{2r^4}{a^4} - B \frac{r^2}{a^2} + C \frac{2a^4}{r^4} + D \frac{a^6}{r^6} \right) \times \\ & \times \left[k\alpha_{11} \sin(\theta)^2 - \alpha_{11} \cos(\theta)^2 + \cos(2\theta) \left(\alpha_{12} + \frac{\alpha_{66}}{2} \right) \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\theta\theta} = & \frac{q}{1-c^2} \left[1 + \frac{b^2}{r^2} - \lambda_1 \lambda_2 c^2 \left(A \frac{3r^4}{a^4} + B \frac{r^2}{a^2} + C \frac{a^4}{r^4} + D \frac{a^6}{r^6} \right) \cos(4\theta) \right] \times \\ & \times \left[\left(\frac{\alpha_{12}}{2} + \frac{\alpha_{66}}{4} \right) \sin(2\theta)^2 + k\alpha_{11} \cos(\theta)^4 + \alpha_{11} \sin(\theta)^4 \right] + \\ & + \frac{q}{1-c^2} \left[1 - \frac{b^2}{r^2} + \lambda_1 \lambda_2 c^2 \left(\frac{2a^2}{r^2} + A \frac{r^4}{a^4} + B \frac{r^2}{a^2} + C \frac{3a^4}{r^4} + D \frac{a^6}{r^6} \right) \right] \times \\ & \times \left[\alpha_{12} - \sin(2\theta)^2 \left(\frac{\alpha_{12}}{2} - \frac{\alpha_{11}}{4} + \frac{\alpha_{66}}{4} - \frac{k\alpha_{11}}{4} \right) \right] - \\ & - \frac{q}{1-c^2} \lambda_1 \lambda_2 c^2 \sin(2\theta) \sin(4\theta) \left(\frac{a^2}{2r^2} - A \frac{2r^4}{a^4} - B \frac{r^2}{a^2} + C \frac{2a^4}{r^4} + D \frac{a^6}{r^6} \right) \times \\ & \times \left[\alpha_{11} \sin(\theta)^2 - k\alpha_{11} \cos(\theta)^2 + \cos(2\theta) \left(\alpha_{12} + \frac{\alpha_{66}}{2} \right) \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_{r\theta} = & -\frac{q}{1-c^2} \left[1 + \frac{b^2}{r^2} - \lambda_1 \lambda_2 c^2 \left(A \frac{3r^4}{a^4} + B \frac{r^2}{a^2} + C \frac{a^4}{r^4} + D \frac{a^6}{r^6} \right) \cos(4\theta) \right] \times \\ & \times \left[\alpha_{11} \sin(\theta)^2 - k \alpha_{11} \cos(\theta)^2 + \left(\frac{\alpha_{12}}{2} + \frac{\alpha_{66}}{4} \right) \cos(2\theta) \right] \cdot \sin(2\theta) + \\ & + \frac{q}{1-c^2} \left[1 - \frac{b^2}{r^2} + \lambda_1 \lambda_2 c^2 \left(\frac{2a^2}{r^2} + A \frac{r^4}{a^4} + B \frac{r^2}{a^2} + C \frac{3a^4}{r^4} + D \frac{a^6}{r^6} \right) \cos(4\theta) \right] \times \\ & \times \left[k \alpha_{11} \sin(\theta)^2 - \alpha_{11} \cos(\theta)^2 + \left(\alpha_{12} + \frac{\alpha_{66}}{2} \right) \cos(2\theta) \right] \sin(2\theta) - \\ & + \frac{q}{1-c^2} \lambda_1 \lambda_2 c^2 \sin(4\theta) \left(\frac{a^2}{2r^2} - A \frac{2r^4}{a^4} - B \frac{r^2}{a^2} + C \frac{2a^4}{r^4} + D \frac{a^6}{r^6} \right). \end{aligned}$$

Введем обозначение $k = 1 + \delta$, причем $\delta \ll 1$ силу слабости анизотропии. Тогда, подставляя в последние три выражения для деформаций равенства (3) и (4), предварительно разложив $\sqrt{1 + \delta}$ и $\sqrt[4]{1 + \delta}$ в ряд Маклорена по степеням δ с сохранением только членов 1-го порядка малости, получим:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{q\alpha_{11}}{1-c^2} \left[(1 - \nu_{12}) - (1 + \nu_{12}) \frac{b^2}{r^2} + \delta \cdot \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \sin(\theta)^2 \right] \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{q\alpha_{11}}{1-c^2} \left[(1 - \nu_{12}) + (1 + \nu_{12}) \frac{b^2}{r^2} + \delta \cdot \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \cos(\theta)^2 \right] \quad (6)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{\delta q \alpha_{11}}{1-c^2} \sin(2\theta) \quad (7)$$

Перемещения связаны с относительными деформациями в полярной системе координат формулами:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{du_{rr}}{dr}; \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u_{rr}}{r} + \frac{1}{r} \frac{du_{\theta\theta}}{d\theta}; \quad \gamma_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{du_{rr}}{d\theta} + \frac{du_{\theta\theta}}{dr} - \frac{u_{\theta\theta}}{r}. \quad (8)$$

Подставляя (5) в первое из уравнений (8), и интегрируя по радиусу r , находим u_{rr} :

$$u_{rr} = \int \varepsilon_{rr} dr = \frac{rq\alpha_{11}}{1-c^2} \left[(1 - \nu_{12}) + (1 + \nu_{12}) \frac{b^2}{r^2} + \delta \cdot \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \sin(\theta)^2 \right] + \zeta(\theta) \quad (9)$$

Подставляя (6) и перемещение (9) во второе из уравнений (8), и интегрируя по углу θ , найдем окружное перемещение $u_{\theta\theta}$:

$$u_{\theta\theta} = \int (r \cdot \varepsilon_{\theta\theta} - u_{rr}) d\theta = \delta \cdot \frac{rq\alpha_{11}}{(1-c^2)} \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right) \cos(\theta)^2 - \int \zeta(\theta) d\theta + \eta(r) \quad (10)$$

Здесь $\zeta(\theta)$ и $\eta(r)$ – неизвестные функции, которые необходимо найти из граничных условий. Подставляя выражение $\gamma_{r\theta}$ из (7) и перемещения u_{rr} и $u_{\theta\theta}$ из (9) и (10) соответственно в третье из уравнений (8), получим уравнение совместности деформаций, из которого найдем неизвестные функции $\eta(r)$ и $\zeta(\theta)$:

$$\frac{\delta q \alpha_{11}}{1-c^2} \sin(2\theta) = \frac{\delta q \alpha_{11}}{1-c^2} \sin(2\theta) + \frac{1}{r} \left(r \frac{d}{dr} \eta(r) - \eta(r) + \frac{d}{d\theta} \zeta(\theta) + \int \zeta(\theta) d\theta \right)$$

Откуда получим:

$$r \frac{d}{dr} \eta(r) - \eta(r) + \frac{d}{d\theta} \zeta(\theta) + \int \zeta(\theta) d\theta = 0 \quad (11)$$

Дифференцируя последнее по θ , приходим к линейному дифференциальному уравнению для $\zeta(\theta)$:

$$\frac{d^2}{d\theta^2} \zeta(\theta) + \zeta(\theta) = 0,$$

решение которого $\zeta(\theta) = A_1 \sin(\theta) + B_1 \cos(\theta)$ есть периодическая функция угла θ с периодом 2π . В силу центральной симметрии задачи, должно выполняться условие периодичности перемещения с периодом π , откуда следует условие $\zeta(\theta) = \zeta(\theta + \pi)$. Так как $\zeta(\theta)$ имеет период 2π , то последнее равенство приводит к нулевому решению $\zeta(\theta) \equiv 0$. Тогда для радиального перемещения окончательно получим:

$$u_{rr} = \frac{rq\alpha_{11}}{1-c^2} \left[(1 - \nu_{12}) + (1 + \nu_{12}) \frac{b^2}{r^2} + \delta \cdot \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right) \sin(\theta)^2 \right] \quad (12)$$

Наконец, найдем окружное перемещение. С учетом того, что $\zeta(\theta) = 0$ функция окружного перемещения (10) примет вид:

$$u_{\theta\theta}(r, \theta) = \frac{\delta}{2} \cdot \frac{rq\alpha_{11}}{(1-c^2)} \left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right) \sin(2\theta) + \eta(r) \quad (13)$$

Из следующих соображений симметрии легко показать, что $\eta(r)$ тоже равно нулю. Так как ортотропное кольцо имеет две оси симметрии OX и OY (см. рис. 2), то верхняя половинка кольца

симметрична нижней половине не только геометрически, но и по упругим свойствам, а также граничным условиям. Раз обе половинки относительно оси OX по всем параметрам симметричны, то симметричным будет и их напряженное состояние, и, в частности, окружные перемещения $u_{\theta\theta}$ каждой половинки (рис. 3).

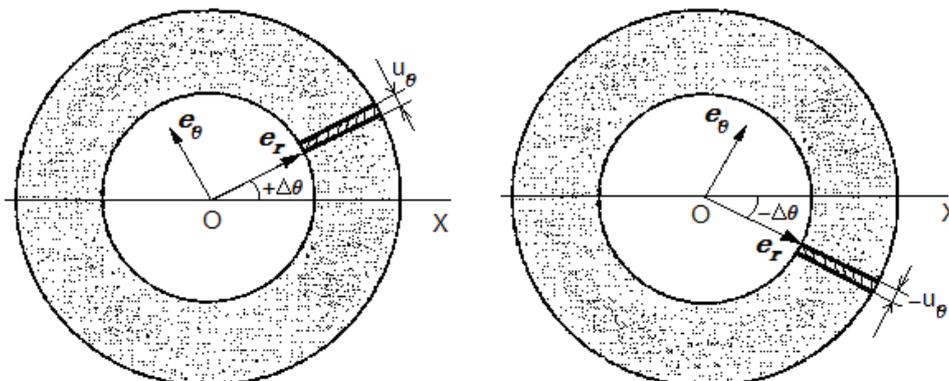


Рис. 3. На рисунке слева угол $\Delta\theta$ положительный и перемещение u_{θ} (штрихованная область) положительно, т.к. совпадает с направлением орта e_{θ} .
На рисунке справа угол $-\Delta\theta$ отрицательный и соответствующее ему перемещение $u_{\theta}(-\Delta\theta)$, симметричное перемещению $u_{\theta}(\Delta\theta)$, направлено против орта e_{θ} , т.е. отрицательное

Функция $u_{\theta\theta}(r, \theta)$, как это видно из рис. 3, должна принимать одинаковые по модулю и противоположные по знаку значения в симметричных относительно оси OX точках $(r; +\Delta\theta)$ и $(r; -\Delta\theta)$, где $b \leq r \leq a$. Множество этих точек вдоль радиуса r образует два симметричных отрезка, которые на рис. 3 выделены жирной линией. Так функция $u_{\theta\theta}(r, \theta)$ – нечетная функция аргумента θ . Для нечетной функции справедливо равенство:

$$u_{\theta\theta}(r, \Delta\theta) = -u_{\theta\theta}(r, -\Delta\theta)$$

Подставляя в последнее равенство выражение (13), находим, что $\eta(r) = 0$. Таким образом, для окружного перемещения приходим к выражению:

$$u_{\theta\theta}(r, \theta) = \frac{\delta}{2} \cdot \frac{rq\alpha_{11}}{(1-c^2)} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \sin(2\theta) \quad (14)$$

Из (13) следует, что при $\theta = 0$, $u_{\theta\theta}(r, \theta) = 0$. То есть, перемещение точек, лежащих на оси OX, в направлении, перпендикулярном этой оси, равно нулю. Этот результат подтверждается соображениями симметрии: для точек кольца, лежащих на главной оси упругости, не должно быть предпочтительного направления перемещения, отличного от направления вдоль этой оси. При $\delta = 0$, т.е. в случае изотропного тела, любая ось становится главной, и тождественно получаем результат

$u_{\theta\theta}(r, \theta) \equiv 0$, который совпадает с результатом в задаче Ламе – частным случаем рассматриваемой задачи при $\delta = 0$ [6].

Результаты исследования

Выражения (7), (12) и (14) решают задачу о перемещениях слабо анизотропного кольца с прямолинейной ортогональной анизотропией с точностью до членов порядка малости δ

Практический же интерес имеют только радиальные перемещения на внутренней границе кольца, которая является режущей кромкой АКВР. Полагая в (12) $r = b$, найдем радиальное биение АКВР, как разность максимального и минимального перемещения кромки:

$$u_b^{\max} = u_{rr}\left(b, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{2b}{1-c^2} \frac{q}{E} (1 + \delta); \quad u_b^{\min} = u_{rr}(b, 0) = \frac{2b}{1-c^2} \frac{q}{E} \quad (15)$$

$$\Delta = u_b^{\max} - u_b^{\min} = \frac{2\delta b}{1-c^2} \frac{q}{E} \quad (16)$$

ГОСТ 26004 – 83 накладывает определенные ограничения, как на величину относительного увеличения диаметра кромки u_b^{\min} , так и на величины радиального биения Δ и анизотропии δ :

$$\frac{u_b^{\min}}{b} \leq 0,008; \quad \Delta \leq 0,05 \text{ мм}; \quad \delta \leq 0,07.$$

Требую выполнение $\frac{u_b^{\min}}{b} \leq 0,008$ во втором выражении (15), для внешней нагрузки q получим условие:

$$q \leq 0,004(1-c^2)E \quad (17)$$

Положим, круг натянут до предела: $q = 0,004(1-c^2)E$. Запишем формулу для радиального биения в этом случае:

$$\Delta = 0,008 \cdot \delta b \quad (18)$$

Отсюда видно, что чем больше круг, точнее, чем больше его внутренний радиус, тем большее радиальное биение будет иметь кромка при заданной анизотропии. Найдем к примеру радиальное биение по для круга больших размеров АКВР 595x235, для которого $b = 117,5$ мм, при максимально допустимом натяжении $q = 0,004(1-c^2)E$ и максимально допускаемой ГОСТ анизотропии $\delta = 0,07$. По формуле (18) имеем: $\Delta = 0,008 \cdot 0,07 \cdot 117,5 = 0,066$ мм, что на 30% превышает максимальное биение, установленное ГОСТом.

Выводы

В статье было найдено решение плоской задачи упругости в перемещениях для слабо анизотропного ортотропного кольца при его равномерном натяжении по внешнему контуру.

Из решения Лехницкого (1) следует, что распределение напряжений при слабой анизотропии, включая окружные напряжения на кромке (которые представляют исключительный практический интерес), в первом приближении совпадает с распределением напряжений в кольце из изотропного материала; поправки на анизотропию – величины второго порядка малости (до 1 %). Таким образом, при наличии слабой анизотропии материала отрезного круга АКВР в практических целях распределение напряжений можно считать таким же, как и в круге из изотропного материала.

В отличие от напряжений, поправки на перемещения – как это видно из (7), (12) и (14), – в первом приближении имеют тот же порядок малости, что и величина δ , что может привести к практически существенным искажениям формы режущей кромки. Так, например, показано, что при оптимальной (максимальной) величине натяжения $q = 0.004(1 - c^2)E$ и значении параметра анизотропии $\delta = 0,07$, еще допустимым ГОСТ 26004 – 83, радиальное биение равно $\Delta = 0,066$ мм, что превышает нормы, установленные этим же стандартом. Так глубокий анализ напряженного состояния анизотропной пластины показал противоречивость некоторых требований к натяжению отрезных кругов.

Список литературы

1. Ерошин С.С. Исследование технологических факторов процесса алмазной резки слитков полупроводниковых материалов на пластины. Дис. канд. техн. наук. – М.:МИЭТ. – 1975. 195 с.
2. Таращанский М.Т. Повышение точности резки полупроводниковых монокристаллов за счет уменьшения неравномерности натяжения корпуса отрезного круга: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 – Процессы механической обработки, станки и инструменты. Луганск 2006. – 201 с.
3. Лехницкий С.Г. Анизотропные пластинки. — М.: ГИТТЛ, 1947. — 355 с.
4. Концентрация напряжений / Под ред. А. Н. Гузя, А. С. Космодамианского, В.П. Шевченко. – К.: А.С.К., 1998. – 387 с. (Механика композитов: В 12 т. Т.7.).
5. Довбня Е.Н. К оценке влияния модуля сдвига на концентрацию напряжений в ортотропной оболочке с круговым отверстием // Динам. системы, 2001, Вып. 17.
6. Тимошенко С.П. Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. – 576 с.

**STRESS – STRAIN STATE OF CUTTING DISCS WITH WEAK ANISOTROPY
OF THE MATERIAL OF THE BODY**

Avetisov R.A., Assistant professor, e – mail: shemotechnik@rambler.ru

Eroshin S.S., Doctor of Technical Sciences, Professor, e – mail: sergey.yeroshin@gmail.com

Lugansk national university of a name of Vladimir Dahl, Molodezhny quarter, 20-a, Lugansk, 91034, Luhansk People's Republic

Abstract

We solve the plane problem of the theory of elasticity in displacements for cutting discs with an inner cutting edge with weak rectilinear anisotropy, which is caused by technological factors. The physical model is a rectangular orthotropic circular ring, which is stretched outside by a constant force. Integrating the stresses presented by Lekhnitskii S.G. in his monograph «Anisotropic Plates», and using the properties of periodicity and symmetry of stresses in the model, all moving in a circular ring were found. In accordance with the GOST 26004-83 (cutting disc standards anisotropy), estimates of the radial runout. As a result of the study, it is concluded that the weak anisotropy of the material (no more than 10%) almost does not change the stressed state of the circular disc, but deforms the cutting edge.

Keywords: cutting discs, weak anisotropy, orthotropic circular ring, cutting of single crystals, Lamé problem.

СОЗДАНИЕ ПРЯМОГО ПРИВОДА КОЛЬЦЕВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ БЕЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ОПОР

*ЕРОШИН С. С., доктор техн. наук, профессор,
АВETИCOB P. A., ассистент
(ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)*

Ерошин С.С. – 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20 а,
ГОУ ВПО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля»,
e – mail: sergey.yeroshin@gmail.com

Аннотация

Идея создания прямого привода кольцевых рабочих органов (КРО) без механических опор заключается в том, что кольцевой рабочий орган выполняет две функции. Он является инструментом и вторичным элементом (якорем) специальной электрической машины. КРО выполнен из токопроводящего материала. Он помещен во вращающееся магнитное поле индуктора, конфигурация которого, обеспечивает систему сил, осуществляющую устойчивое вращение инструмента. Таким образом, вращается и удерживается в пространстве магнитными силами, которые обеспечивают необходимую жесткость и крутящий момент. Предшествующие наши теоретические и экспериментальные исследования подтвердили работоспособность конструкции. Разработан критерий устойчивости вращения, учитывающий конструктивные и технологические факторы специальной электрической машины. Установлено влияние сил трения и полезных сопротивлений на устойчивость движения.

Примером реализации наших решений является созданный центробежный насос, в котором отсутствуют вал, подшипники, уплотнения, муфта. Естественная герметичность корпуса насоса позволяет использовать его для перекачивания химически активных, криогенных и агрессивных жидкостей.

Другим примером является действующий макет станка резки монокристаллов кремния на пластины. Режущий инструмент, алмазный отрезной кругом с внутренней режущей кромкой, не имеет механических опор. Разрезка осуществляется на проход. При прочих равных условиях масса станка уменьшается в 3 – 5 раз.

Ключевые слова: безопорный привод, свободный ротор, резка кремния, центробежный насос.

Введение

Концепция создания прямого привода кольцевых рабочих органов (КРО) без механических опор изложена нами в работах [1, 2]. Особенность такой конструкции заключается в том, что кольцевой рабочий орган выполняет две функции. Он является инструментом и вторичным элементом (якорем) специальной электрической машины. КРО выполнен из токопроводящего материала. Он помещен во вращающееся магнитное поле индуктора, конфигурация которого, обеспечивает систему сил, под действием чего осуществляется устойчивое вращение. Таким образом, КРО вращается и удерживается в пространстве магнитными силами, которые обеспечивают необходимую жесткость и крутящий момент.

В работах [3, 4] приведены результаты экспериментальных исследований реакций свободного кольцевого ротора на радиальную нагрузку, влияние сил трения и полезных сопротивлений на устойчивость движения [5], разработан критерий устойчивости, учитывающий конструктивные и технологические факторы специальной электрической машины [6].

В настоящем сообщении покажем несколько конкретных вариантов применения рабочих органов без механических опор. В каждом случае достигаются такие цели:

- выполнение уникальной работы;
- расширение технологических возможностей машины;
- повышение технико-экономических показателей машины.

Описание исследований

Устойчивое вращение КРО без механических опор и без механической связи, для передачи ему кинетической энергии, позволяет осуществлять управляемое плоскопараллельное движение рабочего органа в объеме, отделенном от электромагнитного индуктора герметичной диэлектрической перегородкой.

На рис. 1 показана пластмассовая кювета с водой, на дне которой расположено рабочее колесо центробежного насоса. Кювета установлена на индуктор, который приводит колесо во вращение. Колесо устойчиво вращается и «гонит» воду от центра. При перемещении кюветы относительно индуктора колесо всегда остается над индуктором.

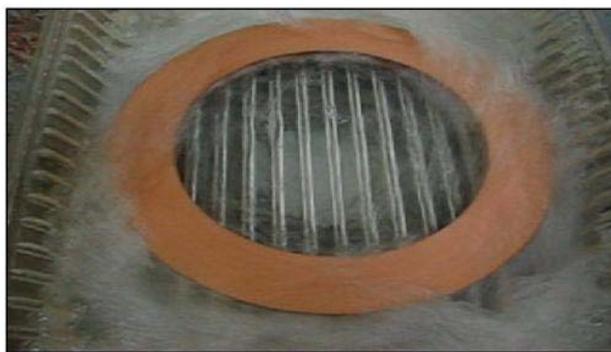


Рис. 1. Вращение рабочего колеса в кювете с водой

Если кольцо ротора оснастить абразивным или каким-либо другим режущим инструментом, то можно проводить механическую обработку внутренней поверхности герметичной емкости, управляя процессом снаружи.

На этом же принципе могут быть построены всевозможные мешалки и импеллеры, предназначенные для перемешивания химически активных, ядовитых, криогенных или других жидкостей, требующих высокого уровня герметичности при производстве работ. Другим направлением эффективного применения рабочих органов без механических опор являются центробежные и другие динамические насосы. Предлагаемый принцип обеспечивает следующие преимущества:

- исключение из конструкции вспомогательных деталей (вала, муфты, подшипников, уплотнений и пр.) повышает технико-экономические показатели насоса;
- моноблочность и высокая герметичность корпуса позволяют использовать насос в качестве погружного или для перекачки химически активных, ядовитых, криогенных и других подобных жидкостей.

Нами изготовлены опытные образцы насосов. Центробежный насос ЦНС-1 (рис. 2) имеет спиральный отвод жидкости, а насос ЦНО-1 (рис. 3) изготовлен с соосным отводом жидкости. Насосы представляют собой агрегаты, которые в одном корпусе содержат и центробежный насос и двигатель. Они не имеют вала и подшипников. Технические параметры насосов приведены в табл. 1.

Третьим направлением применения рабочих органов без механических опор могут быть обрабатывающие станки, в которых используется кольцевой инструмент. Характерным примером являются станки резки слитков полупроводниковых материалов на пластины. В традиционном станке резки применяется алмазный круг с внутренней режущей кромкой (АКВР). Известно, что диаметр АКВР должен быть в четыре раза больше диаметра разрезаемого слитка. Японский станок фирмы TOYO модели T – SM – 300, предназначенный для резки монокристаллов кремния диаметром 300 мм, имеет внешний диаметр АКВР 1200 мм, массу – 4200 кг, потребляемую мощность – 8 кВт. Для сообщения инструменту осевой жесткости его устанавливают в специальном барабане и натягивают как шкуру. Вес натяжного барабана может достигать нескольких сот килограммов.



Рис. 2. Центробежный насос ЦНС – 1



Рис. 3. Центробежный насос ЦНО – 1

Таблица 1

Технические параметры насосов ЦНС – 1 и ЦНО – 1

| Технический параметр | ЦНС – 1 | ЦНО – 1 |
|---------------------------|---------|---------|
| Диаметр, мм | 200 | 180 |
| Высота, мм | 170 | 225 |
| Масса, кг | 6,4 | 7,3 |
| Потребляемая мощность, Вт | до 700 | до 700 |

Нами предложен способ резки слитков монокристаллов «на проход» (см. рис. 4) в котором алмазный отрезной круг с внутренней режущей кромкой имеет ширину меньшую, чем диаметр разрезаемого слитка [9]



Рис. 4. Резка слитка кремния на проход инструментом без механических опор
1 – корпус алмазного отрезного круга новой конструкции; 2 – разрезаемый слиток кремния;
3 – отрезаемая пластина; 4 – алмазная режущая кромка

Инструмент является свободным ротором, то есть не имеет механических опор, что обеспечивает сквозной проход его через всю толщину монокристалла. Масса нового инструмента, а тем более момент инерции, в сотни раз меньше, чем у натяжного барабана станка традиционной конструкции. Станок, реализующий наш метод, не имеет шпинделя. Инструмент, он же кольцевой ротор, приводится в движение магнитным полем без передаточного механизма и механических опор. На рис. 5 показана схема такого станка.

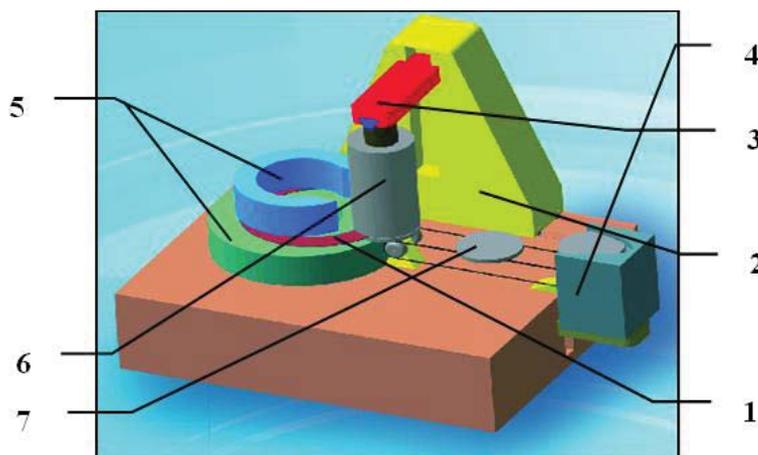


Рис.5. Схема бесшпиндельного станка резки монокристаллов
1 – алмазный отрезной круг; 2 – механизм поперечной подачи; 3 – механизм подачи на толщину отрезаемой пластины; 4 – устройство кассетирования отрезанных пластин;
5 – плоский двусторонний индуктор; 6 – разрезаемый слиток; 7 – пластина

Сравнение нового станка со станками традиционной конструкции показывает, что при прочих равных условиях размеры инструмента уменьшаются в 2...3 раза, масса вращающихся частей в сотни раз, масса станка в десятки раз, энергопотребление в 1,5...3 раза. Простота и технологичность конструкции гарантируют низкую себестоимость изготовления таких станков.

Для подтверждения работоспособности и эффективности использования ДАД в качестве привода АКВР без механических опор был разработан и изготовлен действующий макет бесшпиндельного станка резки слитков монокристаллов на проход (рис. 6).

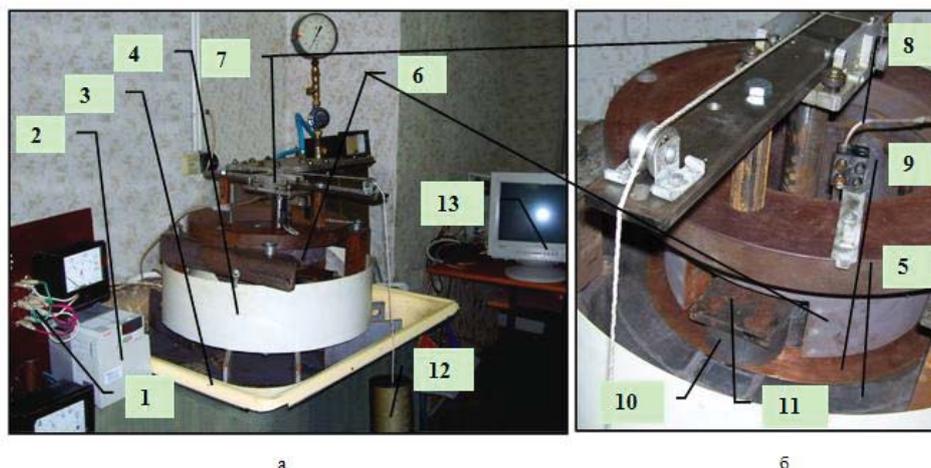


Рис. 6. Общий вид макета станка (а) и его фрагмент крупным планом (б)

Электропитание станка осуществляется через коммутационную панель 1 от преобразователя частоты 2. Сам станок помещен на поддон 3, а зона резки закрывается защитным кожухом 4. Статор ДАД закрыт защитным колпаком 5. Над его поверхностью расположен составной магнитопровод 6, на котором закреплен механизм поперечной подачи 7 и трубопровод 8 для подачи охлаждающей жидкости. В рабочий зазор ДАД помещается АКВР 9. Разрезаемый на пластины монокристалл кремния 10 приклеивается на кронштейн 11 механизма поперечной подачи 7. Постоянная сила резания создается с помощью противовеса 12, приводящего в действие механизм подачи 7. Управление скоростью вращения АКВР осуществляется по средствам ПК.

На опытном образце станка были отрезаны пластины от слитков кремния диаметрами 62 мм и 76 мм алмазным кругом, который имеет значительно меньшую ширину полки – 46,5 мм. То есть в процессе резки инструмент всей полкой углублялся в пропилен и проходил через него. Из рис. 6 видно, как алмазный круг 1 бесшпиндельного станка впервые режет слиток кремния 2 напроход.



Рис. 6. Резка слитка кремния напроход

Основные параметры, полученные при испытаниях опытного образца бесшпиндельного станка резания, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры макета бесшпиндельного станка резки монокристаллов

| Название параметру | Единицы измерения | Значение |
|--|---------------------|----------------|
| Диаметр АКВР | мм | 312 |
| Толщина АКВР | мм | 0,5 |
| Ширина АКВР | мм | 46 |
| Диаметры слитков, которые отрезались | мм | 62 и 76 |
| Максимальный диаметр слитка для разрезания | мм | 150 |
| Рабочая частота вращения АКВР | об/мин | 1200...1560 |
| Максимальная частота вращения АКВР | об/мин | 3100 |
| Положение АКВР при резки | - | горизонтальное |
| Скорость поперечной подачи слитка | мм/мин | 2.4 |
| Расход воды для охлаждения | м ³ /год | 0,02 |
| Давление воды для охлаждения | атм | 0,25 |
| Производительность вентилятора воздушного охлаждения | м ³ /год | 20 |
| Потребляемая мощность станка | кВт | 1,0...1,3 |
| Масса опытного образца станка резки | кг | 115 |

Выводы

1. Разработаны и изготовлены два опытных образца центробежных насосов с рабочим колесом без механических опор со спиральным и соосным отводом жидкости. Единственной подвижной деталью этих насоса есть рабочее колесо, которое осуществляет устойчивое вращение в магнитном поле и не имеет механических опор. Принципиальным преимуществом насосов с прямым приводом на основе ДАД является высокая герметичность их корпуса. Это повышает надежность насосов и позволяет использовать их для перекачивания химически активных, криогенных и агрессивных жидкостей.

2. Проведены опытные испытания центробежных насосов в промышленных условиях на НПП «Сатурн» г. Киев и на Краснодарском заводе «Автоагрегат». В ходе испытаний опытные образцы насосов показали свою работоспособность и высокий уровень герметичности корпуса, низкий уровень шума. По результатам испытаний составлены соответствующие протоколы.

3. Изготовлен на основе ДАД действующий макет станка резки слитков монокристаллов. Впервые произведена резка слитков кремния алмазным кругом без механических опор новым, более эффективным, способом – напроход. Проведенные в лабораторных условиях испытания показали эффективность нового способа резки.

Список литературы

1. Єрошин С.С. Концепція створення машин і приладів з прямим приводом робочих органів без механічних опор / С.С. Єрошин //ISSN 1729-4959, Машинознавство. – 2007. – №2(116). – С. 27 – 32.
2. Yeroshin S. Concept of developing machines and devices with the direct rotation of rotor without mechanical supports / S. Yeroshin, A. Golubenko // TEKA Commission motorization and power industry in agriculture. – Polish Academy Of Sciences branch in Lublin, – 2008. – Vol. 10 A. – pp. 37 – 46.

3. Ерошин С.С. Повышение эффективности машин применением рабочих органов без механических опор / С.С. Ерошин, В.Е. Брешев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – №5(17). – С. 82 – 85.
4. Ерошин С.С., Невзлин Б.И., Брешев В.Е. Экспериментальное исследование реакций свободного кольцевого ротора на радиальную нагрузку / С.С. Ерошин, Б.И. Невзлин, В.Е. Брешев // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2005. – № 1(10). – С. 23 – 25.
5. Ерошин С.С. Влияние сил трения на устойчивость движения кольцевого ротора дискового асинхронного двигателя / С.С. Ерошин, М.Т. Таращанский, С.А. Мирошник // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2009. – № 2(19) – С. 58 – 61.
6. Ерошин С.С., Таращанский М.Т., Мирошник С.А. Исследование критерия устойчивости кольцевого ротора асинхронного торцевого двигателя / С.С. Ерошин, М.Т. Таращанский, С.А. Мирошник // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. Збірник наукових праць – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2008. – С. 229 – 234.
7. Ерошин С.С. Определение оптимальной толщины кольцевого ротора дискового асинхронного двигателя / С.С. Ерошин, С.А. Мирошник // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №5/1(41). – С. 30 – 35.
8. Yeroshin S. Improving the stability rotation ring rotor without mechanical supports / S. Yeroshin, S. Miroshnik // TEKA Commission motorization and power industry in agriculture. – Polish Academy Of Sciences branch in Lublin, 2011. – Vol. 11 A. – p. 282 – 289.
9. Ерошин С.С. Применение дискового асинхронного двигателя в узлах резки крупногабаритных слитков монокристаллов / С.С. Ерошин, С.А. Мирошник, С.В. Крыжний // Вісник Східноукраїнського Національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ. – 2012. № 4. – С.142 – 145.

**THE DEVELOPMENT OF MACHINES AND DEVICES WITH DIRECT
ROTATION OF ROTOR WITHOUT MECHANICAL SUPPORT**

Eroshin S.S., Doctor of Technical Sciences, Professor, e – mail: sergey.yeroshin@gmail.com

Avetisov R.A., Assistant professor, e – mail: shemotechnik@rambler.ru

Lugansk national university of a name of Vladimir Dahl, Molodezhny quarter, 20-a, Lugansk, 91034, Luhansk People's Republic

Abstract

The underlying principle of a direct drive with circular working parts (CRP) without mechanical supports is that the ring-shaped part performs two functions. It is an instrument and a secondary element (anchor) of a special electric machine. CRP is made of a conductive material. It is placed in the rotating magnetic field of the inductor, the configuration of which provides a system of forces, under the effect of which a stable rotation of the tool is provided. Thus, it is rotated and held in space by magnetic forces, which provide the necessary rigidity and torque. Our previous theoretical and experimental studies have confirmed the workability of the structure. A criterion for the stability of rotation, taking into account the design and technological factors of the special electric machine, was developed. The effect of frictional forces and useful resistances on the stability of motion is established.

An example of the implementation of our solution is the centrifugal pump, which has no shaft, bearings, sealings, couplings. The natural hermeticity of the pump housing allows it to be used for pumping chemically active, cryogenic and corrosive liquids.

Another example is the working sample of the machine for cutting silicon mono-crystals to slices. The cutting tool is a diamond saw with an inner cutting edge, does not have mechanical support. One go cutting is possible. Other things being equal, the mass of the machine is reduced by 3 ... 5 times.

Keywords: stability of motion, unsupported drive, levitation rotor, silicon cutting, centrifugal pump.

УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ РОТОРА БЕЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ОПОР

*ЕРОШИН С. С., доктор техн. наук, профессор,
АВETИCOB P. A., ассистент
(ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)*

Ерошин С.С. – 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20 а,
ГОУ ВПО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля»,
е – mail: sergey.yeroshin@gmail.com

Аннотация

Сокращение количества вращающихся деталей, повышение надёжности при снижении себестоимости машины, уменьшение её массы и энергопотребления могут быть достигнуты путем передачи крутящего момента и стабилизирующих сил непосредственно на кольцевой рабочий орган магнитным полем. В этом случае исключаются механические опоры в виде узлов подшипников и приводной вал, что упрощает конструкцию. Сам рабочий орган становится вторичным элементом специальной электрической машины. Целью настоящей работы является разработка математической модели устойчивого вращения свободного кольцевого ротора и формулирование требований к системе внешних сил, обеспечивающих такое вращение. Разработана математическая модель процесса, получен критерий устойчивости движения, предложены способы повышения запаса устойчивости.

Ключевые слова: устойчивость движения, безопорный привод, свободный ротор.

Введение

В настоящее время существует достаточно много приборов и машин, рабочие органы которых имеют форму плоского кольца, вращающегося вокруг оси симметрии. Примерами могут служить роторы гироскопов, рабочие колеса динамических насосов, дисковые пилы обрабатывающих станков. Традиционно, кольцевой рабочий орган (КРО) приводится во вращение и удерживается в пространстве, а также воспринимает полезные нагрузки и силы сопротивлений посредством шпиндельного узла или вала. Последний получает вращение от отдельного электродвигателя и, в большинстве случаев, через промежуточную передачу.

Для повышения технического уровня машин и приборов применяют прямой привод и бесконтактные опоры. Прямой привод рабочего органа частично исключает промежуточные передачи, но оставляет в конструкции шпиндель или вал. Бесконтактные опоры позволяют увеличить рабочую частоту вращения и долговечность машин, снизить потери на трение, однако при этом не уменьшается число вращающихся деталей и их масса, на одном уровне остаются энергопотребление. Массогабаритные параметры и себестоимость машин повышаются.

Сокращение количества вращающихся деталей, повышение надёжности при снижении себестоимости машины, уменьшение её массы и энергопотребления могут быть достигнуты путем бесконтактной (без механической связи) передачи крутящего момента и стабилизирующих сил непосредственно на КРО. В этом случае исключаются механические опоры в виде узлов подшипников и приводной вал, что упрощает конструкцию. Сам рабочий орган становится вторичным элементом специальной электрической машины.

Основная идея при создании таких машин заключается в обеспечении устойчивого движения КРО без механических опор. Целью настоящей работы является разработка математической модели устойчивого вращения свободного кольцевого ротора и формулирование требований к системе внешних сил, обеспечивающих такое вращение.

Описание исследований

Будем рассматривать рабочий орган в виде плоского кольца (или шайбы), которое вращается вокруг оси симметрии в отсутствие традиционных механических опор. При этом крутящий момент, приводящий КРО во вращательное движение, и реакция системы, на смещение от положения равновесия, должны быть обеспечены силами другой природы, например, электродинамическими.

Крутящий момент может быть создан системой сил симметричных относительно оси вращения и направленных перпендикулярно радиусу. Назовем эту систему сил - тангенциальной. Она может быть создана вращающимся силовым полем. Если силы полезных и вредных сопротивлений осесимметричны, то вращение КРО будет происходить вокруг оси симметрии системы тангенциальных сил, то есть оси вращения силового поля, которую будем считать осью машины.

Вращение будет устойчивым, если при сколь угодно малом (или разумно большом) смещении ротора относительно оси вращения силового поля возникает реакция, направленная в сторону противоположную смещению и пропорциональная по модулю величине смещения. Такую отрицательную обратную связь можно обеспечить радиальной системой сил, которые удерживают ротор в смещенном состоянии или возвращают его в положение равновесия, если причина смещения исчезает.

Таким образом, система внешних сил должна приводиться к главному моменту, направление которого совпадает с осью машины, и главному вектору, направленному против смещения. Если смещение отсутствует – главный вектор равен нулю.

Предположим, что силы внешних сопротивлений пропорциональны первой степени скорости. В этом случае движение центра масс КРО описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} x'' + vx' = -ax - by \\ y'' + vy' = bx - ay \end{cases} \quad (1)$$

где $a = D_r / m$, $b = D_\tau / m$, а D_r и D_τ - определяют жёсткость бесконтактной опоры КРО соответственно в радиальном и тангенциальном направлениях; $v = V/m$ - кинематический коэффициент сопротивления движению; m - масса ротора.

На основании теории устойчивости движения был получен критерий, выполнение которого, обеспечивает асимптотическую устойчивость вращения КРО без механических опор:

$$v \frac{\sqrt{a}}{b} > 1 \quad \text{или} \quad \frac{V \sqrt{D_r}}{D_\tau \sqrt{m}} > 1 \quad (2)$$

На рис. 1, а приведено частное решение системы дифференциальных уравнений (1) при движении центра масс КРО из точки с координатами (-1,-1) с начальной скоростью равной нулю. Параметры $a = 2$; $b = 0,02$ и $v = 2$ подобраны так, что бы критерий устойчивости выполнялся.

В соответствии с начальными условиями центр масс вращающегося рабочего органа при $t=0$ находится не в начале координат, но с течением времени приближается к началу системы отсчета, в котором расположена ось вращения силового поля, и остается там сколь угодно долго. Решение системы дифференциальных уравнений, при условии $v \sqrt{a}/b < 1$ (см. рис. 1, б), которое не соответствует критерию устойчивости, показывает, что даже малого возмущения достаточно для потери устойчиво

сти движения. Вращающийся КРО, будет удаляться от центра координат по расходящейся спирали.

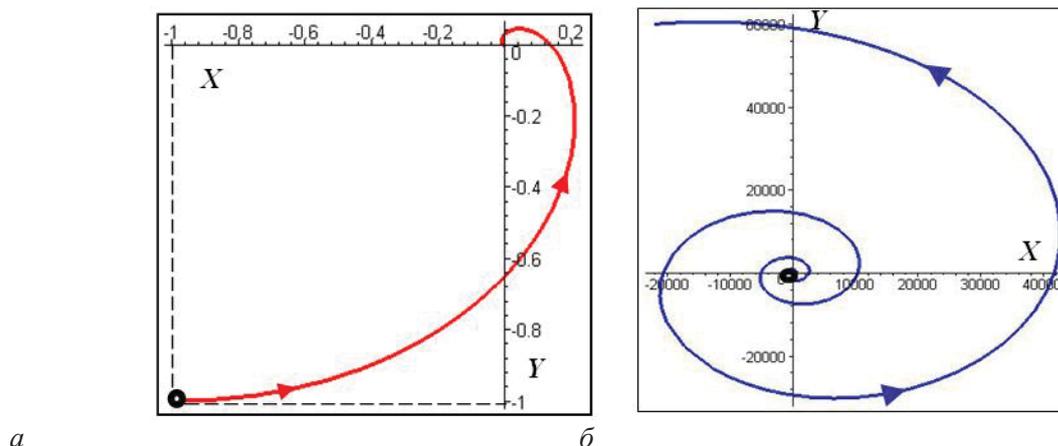


Рис. 1. Траектория центра масс КРО при устойчивом – а и при неустойчивом – б движении

Критерий (2) показывает, что устойчивость движения увеличивается при росте сопротивления среды V и жёсткости бесконтактной опоры в радиальном направлении D_r , а также при уменьшении жесткости в тангенциальном направлении D_τ и увеличении массы m . Чем больше левая часть неравенства (2), тем больше запас устойчивости.

Параметры D_r и D_τ являются конструктивными. Именно они определяют устойчивость движения. D_r и D_τ показывают, соответственно, какую радиальную и тангенциальную составляющие имеет реакция бесконтактной опоры при смещении центра масс ротора на единицу длины. Если $D_\tau = 0$, движение становится абсолютно устойчивым. Для создания условий, обеспечивающих абсолютную устойчивость, исследуем силы, действующие на ротор.

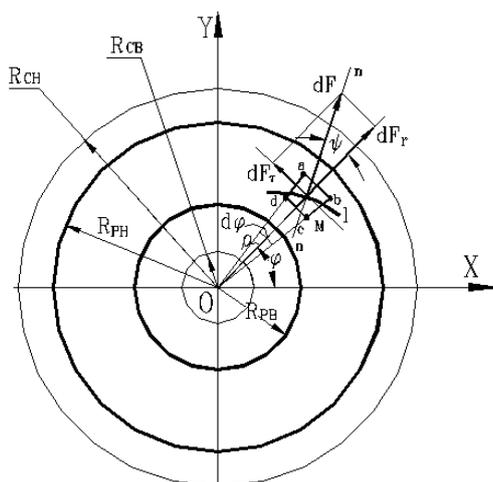


Рис. 2. Расчетная схема силы dF

Пусть кольцевая пластина, выполняющая функции КРО, изготовлена из токопроводящего материала и находится во вращающемся вокруг центра O , магнитном поле, которое создаётся индуктором с трёхфазной обмоткой. На каждую элементарную площадку $abcd$ кольцевой пластины будет действовать элементарная электродинамическая сила dF , которая перпендикулярна пазу с обмоткой l . Можно считать, что вектор dF приложен в точке M (геометрический центр площадки), и образует с радиус-вектором ρ , угол Ψ (рис.2).

Симметричное относительно центра O силовое поле приводит к возникновению также симметричной системы электродинамических сил dF на кольцевой пластине. Считаем, что эти силы лежат в плоскости XOY и их действие распространяется на некоторую ограниченную область, называемую полем сил. R_{CH} и R_{CB} – внешний и внутренний радиусы поля сил, а R_{PH} , R_{PB} – внешний и внутренний радиусы кольцевой пластины.

Вектор элементарной силы dF , определен нами в работе [1].

$$dF = \frac{(\omega_c - \omega_p)}{4\rho_{y\delta}} \delta B^2 \rho^2 d\rho d\phi \quad (3)$$

или

$$dF = CB^2 \rho^2 d\rho d\phi, \quad (4)$$

где

$$C = \frac{(\omega_c - \omega_p)}{4\rho_{y\delta}} \delta. \quad (5)$$

Вектор dF может быть представлен суммой тангенциальной dF_τ и радиальной dF_r , составляющих (см. рис. 2):

$$dF_\tau = dF \cdot \sin \psi; \quad (6)$$

$$dF_r = dF \cdot \cos \psi. \quad (7)$$

В работе [1] путем интегрирования элементарных сил по всей площади пластинки показано, что если центр симметрии кольцевой пластины совпадает с центром симметрии силового поля и если магнитная индукция B по всей области действия сил постоянна, то главный вектор будет равен нулю, а главный момент определяется выражением:

$$M_{от} = \frac{\pi}{2} C_\tau B^2 (R_{PH}^4 - R_{PB}^4). \quad (8)$$

Под действием $M_{от}$, рабочий орган будет совершать вращение вокруг главной оси инерции и разгоняться до такой скорости, при которой момент $M_{от}$ будет равен сумме моментов сил сопротивления и технологической нагрузки.

Если по какой-либо причине произойдет смещение центра вращения ротора от центра вращения поля, например, вдоль оси OX на величину e_x , главный момент изменит свою величину.

$$M_{or} = \frac{\pi}{2} C_{\tau} B^2 (R_{PH}^4 - R_{PB}^4) + \pi C_{\tau} B^2 (R_{PH}^2 - R_{PB}^2) e_x^2. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что первое слагаемое, полностью соответствует выражению (8), второе – пропорционально квадрату смещения e_x . Смещение e_x приводит к появлению главного вектора. Его радиальная составляющая совпадает с направлением смещения и равна:

$$F_{rx} = C_{\tau} B^2 e_x \pi (R_{PH}^2 - R_{PB}^2). \quad (10)$$

Когда F_{rx} направлена в сторону противоположную смещению, она вызывает стабилизирующее воздействие. Противоположное направление F_{rx} приводит к потере устойчивости. Тангенциальная составляющая главного вектора $F_{\tau y}$ всегда направлена перпендикулярно смещению и всегда является дестабилизирующим фактором. Ее величина равна.

$$F_{\tau y} = C_{\tau} B^2 e_x \pi (R_{PH}^2 - R_{PB}^2). \quad (11)$$

Если F_{rx} и $F_{\tau y}$ разделить на e_x , то получим жесткости D_r и D_{τ} . Для того чтобы устойчивость движения была наибольшей, D_r должно стремиться к нулю. Это следует из критерия устойчивости (2). Для выяснения условий, при которых $D_r = 0$, а значит, и $F_{\tau y} = 0$, рассмотрим расчетную схему на рис.3.

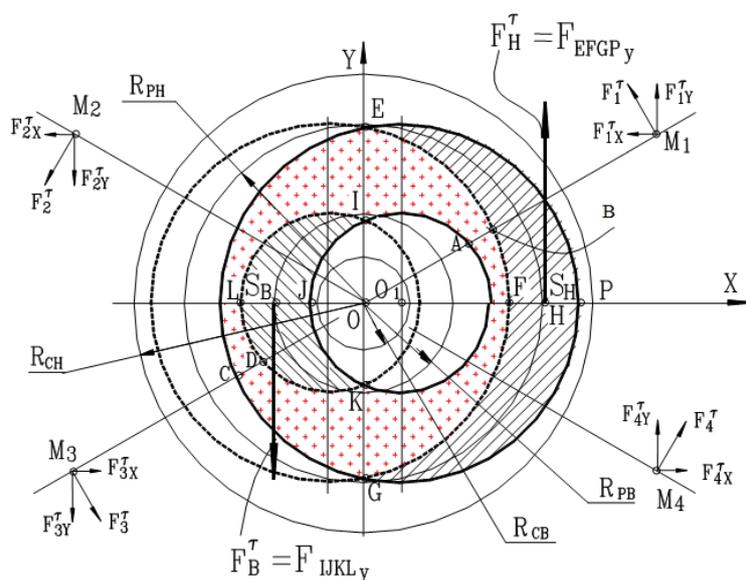


Рис. 3. Расчетная схема дестабилизирующей силы $F_{\tau y}$

В системе координат XOY тонкими линиями изображены границы силового поля и кольцевой пластины в положении, когда их центры вращения и симметрии совпадают.

Толстыми сплошными линиями показано положение кольца при смещении его центра вдоль оси OX на величину e_x в точку O_I . Пунктирными линиями показано кольцо – симметричное последнему.

На поверхности кольцевой пластины можно выделить три области, представляющие собой плоские фигуры, ограниченные дугами окружностей. Первая – центральная, заштрихованная крестиками, имеет осевую симметрию.

Вторая заштрихована линиями с положительным наклоном, обозначена S_H . Она непосредственно примыкает к наружному контуру кольцевой пластины и имеет серповидную форму. Наибольшую толщину серпика в сечении FP будем обозначать ε_H . Для условий рис. 3, $\varepsilon_H = 2e_x$.

Третья область заштрихована линиями с отрицательным наклоном и обозначена как S_B . Она примыкает к внутреннему контуру рабочего органа и также имеет серповидную форму. Как и в предыдущем случае, обозначим отрезок LJ как $\varepsilon_B = 2e_x$.

Не проводя интегрирования можно показать, что, в силу осевой симметрии центральной области, суммы проекций на координатные оси всех сил, действующих на точки этой области равны нулю. Эти силы создают только крутящий момент и приводят кольцевой ротор во вращение.

Фигуры S_H и S_B не симметричны, расположены на разных расстояниях от центра и имеют разные площади. Именно они определяют возникновение равнодействующих F_r и F_τ .

Для объяснения этого выделим в первом и четвертом квадрантах симметричные точки M_I и M_4 , расположенные в области S_H . Так как фигура S_H симметрична относительно оси OX , то $F_{Ix}^r + F_{4x}^r = 0$, а $F_{Iy}^r + F_{4y}^r \neq 0$. Значит, на область S_H будет действовать сила F_H^r .

Подобные рассуждения можно провести для фигуры S_B и доказать существование силы F_B^r . В общем случае F_H^r и F_B^r не равны между собой. Именно они создают дополнительный крутящий момент (9), а их разность является источником дестабилизирующей силы F_φ .

Интегрирование, выполненное нами в работе [1], полностью подтвердило формулы (10) и (11). Физический смысл F_{rx} и $F_{\tau y}$ заключается в том, что они равны разности сил, действующих на наружный и внутренний серпики.

$$F_{rx} = F_H^r - F_B^r = C_{rH} B_H^2 \varepsilon_H \pi R_{PH}^2 - C_{rB} B_B^2 \varepsilon_B \pi R_{PB}^2 \quad (12)$$

$$F_{\tau x} = F_H^\tau - F_B^\tau = C_{\tau H} B_H^2 \varepsilon_H \pi R_{PH}^2 - C_{\tau B} B_B^2 \varepsilon_B \pi R_{PB}^2 \quad (13)$$

Если индукция магнитного поля во всех точках будет постоянной, то есть $B_H = B_B$, и если $\varepsilon_H = \varepsilon_B$, условие $F_{\tau y} = 0$ не может быть выполнено. В табл. 1 приведены варианты, которые исследовались для выполнения условия $F_{\tau y} = 0$.

Таблица 1

| Соотношение между внутренними радиусами | Соотношение между внешними радиусами | Дополнительные условия | Условие устойчивого вращения |
|---|--------------------------------------|---|------------------------------|
| $R_{PB} - R_{CB} > e_x$ | $R_{CH} - R_{PH} > e_x$ | $B_e \neq B_n, \varepsilon_B = \varepsilon_H$ | $R_{me} B_e = R_{mn} B_n$ |
| $R_{CB} - R_{PB} > e_x$ | $R_{PH} - R_{CH} > e_x$ | $B_e \neq B_n, \varepsilon_B = \varepsilon_H$ | $R_{Ce} B_e = R_{Cn} B_n$ |
| $R_{CB} - R_{PB} > e_x$ | $R_{CH} - R_{PH} > e_x$ | $B_e \neq B_n, \varepsilon_B = \varepsilon_H$ | Не существует |
| $R_{PB} - R_{CB} > e_x$ | $R_{PH} - R_{CH} > e_x$ | $B_e \neq B_n, \varepsilon_B = \varepsilon_H$ | Не существует |
| $R_{PB} - R_{CB} > e_x$ | $R_{..n} = R_{mn}$ | $B = const, \varepsilon_B = 2\varepsilon_H$ | $R_{me} \sqrt{2} = R_{mn}$ |
| $R_{CB} - R_{PB} > e_x$ | $R_{..n} = R_{mn}$ | $B = const, \varepsilon_B = 2\varepsilon_H$ | $R_{Ce} \sqrt{2} = R_{Cn}$ |
| $R_{..e} = R_{me}$ | $R_{CH} - R_{PH} > e_x$ | $B = const, \varepsilon_H = 2\varepsilon_B$ | Не существует |
| $R_{..e} = R_{me}$ | $R_{PH} - R_{CH} > e_x$ | $B = const, \varepsilon_H = 2\varepsilon_B$ | Не существует |

Варианты 1 и 2 показывают, что условие $F_{\tau y} = 0$ может быть достигнуто за счет неравенства магнитной индукции на внутреннем и наружном контурах кольцевого ротора. Если по всей поверхности индуктора $B = const$, то равенство нулю силы $F_{\tau y}$ возможно при $R_{..n} = R_{mn}$ (см. варианты 5 и 6).

Если считать, что в выражениях (12) и (13) $C_{rH}/C_{\tau H} = C_{rB}/C_{\tau B}$, что будет иметь место, если векторы элементарных электродинамических силы на внешнем и на внутреннем контурах коллинеарны, то при равенстве нулю тангенциальной составляющей главного вектора, его радиальная составляющая тоже будет равна нулю. Это приведет к безразличному равновесию ротора и потере устойчи-

вости. Для получения асимптотической устойчивости необходимо, чтобы $C_{rH}/C_{\tau H} \neq C_{rB}/C_{\tau B}$. В этом случае, согласно выражениям (12) и (13), если $F_{\tau y} = 0$, то $F_{ry} \neq 0$

Результаты и обсуждение

Нетрудно показать, что при смещении ротора, происходящем под действием силы, приложенной к внутреннему контуру, устойчивость не теряется, а повышается, так как внешняя сила и реакция ротора создают пару сил, возвращающую ротор в исходное равновесие. Таким образом, внешняя сила, или группа сил, приложенных по внутреннему контуру ротора, обеспечивают устойчивое равновесие.

Если же внешние силы приложены к внешнему контуру, то равновесие становится неустойчивым.

Таким образом, система внешних сил должна удовлетворять следующим условиям:

1. Система внешних сил должна быть осесимметрична.
2. Каждая элементарная сила должна быть направлена к радиусу под углом, то есть иметь как радиальную, так и тангенциальную составляющие. В этом случае при совпадении оси вращения рабочего органа с осью симметрии поля (например, на холостом ходу), главный вектор будет равен нулю, а система сил будет приводиться к главному моменту.
3. При возникновении сколь угодно малого смещения осей, помимо крутящего момента появится главный вектор, имеющий радиальную и тангенциальную составляющие. Радиальная состав

ляющая должна быть направлена в сторону, противоположную смещению и обеспечивать реакцию рабочего органа на радиальное смещение.

4. Тангенциальная составляющая главного вектора не может быть уравновешена, так как направлена перпендикулярно смещению, но может быть сведена к минимуму. Для этого, система должна быть такой, чтобы вдоль радиуса поля элементарные силы не были коллинеарными.

5. Сопротивление среды, а также силы внешних сопротивлений, приложенные к внутреннему контуру свободного ротора, способствуют устойчивому вращению.

Была проведена всесторонняя экспериментальная проверка полученных результатов, которая подтвердила адекватность математической модели [2].

Выводы

1. Теоретически, экспериментально и на конкретных реальных примерах показана возможность применения кольцевых рабочих органов без механических опор и передаточного механизма.

2. Разработана математическая модель процесса, получен критерий устойчивости движения, предложены способы повышения запаса устойчивости.

Список литературы

1. Ерошин С.С. Определение сил, действующих на кольцевую пластинку, находящуюся во вращающемся магнитном поле //Збірник наукових праць Східноукраїнського державного університету. Серія Машинобудування. – Видавництво СУДУ. – Луганськ 1998. – С. 13 – 21.

2. Ерошин С.С., Невзлин Б.И., Брешев В.Е. Экспериментальное исследование реакции свободного кольцевого ротора на радиальную нагрузку // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2005. - №1(10). – С. 23 – 25.

STABILITY OF ROTOR MOTION WITHOUT MECHANICAL SUPPORTS

Eroshin S. S., Doctor of Technical Sciences, Professor e – mail: sergey.yeroshin@gmail.com

Avetisov R.A., Assistant professor, e – mail: shemotechnik@rambler.ru

Lugansk national university of a name of Vladimir Dahl, Molodezhny quarter, 20-a, Lugansk, 91034, Luhansk People's Republic

Abstract

It has been established that the use of rotating parts without mechanical support allows creating machines consisting of the minimal number of details. This makes their construction much more simple and rational. It has been researched how construction factors influence the stability of the rotation. The possibility of application of a free rotor as the cutting part in the semiconductor ingot cutting machines and as the rotor for rotary pumps has been confirmed experimentally.

Keywords: stability of motion, unsupported drive, levitation rotor.

РАСЧЁТ ПРОФИЛЯ КРУГЛОГО ФАСОННОГО РЕЗЦА

*ДУДАК Н. С., канд. техн. наук, доцент,
КАСЕНОВ А. Ж., канд. техн. наук,
ИТЫБАЕВА Г. Т., канд. техн. наук,
МУСИНА Ж. К. канд. техн. наук*

(Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар, Казахстан)

Касенов А.Ж. – 140008, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова 64,
Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова,
е – mail: asylbek_kasenov@mail.ru

Аннотация

Рассмотрен новый способ расчёта круглых фасонных резцов с базовой линией – графический и аналитический. В отличие от существующей методики индивидуального профилирования, в зависимости от фасонного профиля детали предложена методика, которая систематизирует графический расчёт и позволяет применить унифицированный подход и легко автоматизировать расчёт.

Разработан простой и наглядный способ графического и коррекционного аналитического расчёта круглых фасонных резцов с базовой линией: графическое профилирование круглого фасонного резца состоит из двенадцати этапов; коррекционное аналитическое профилирование круглого фасонного резца включает семь шагов.

Ключевые слова: Круглый фасонный резец, базовая линия, графическое профилирование, аналитическое профилирование, новая методика расчёта, автоматизация расчёта, проекции, узловые точки, алгоритм расчёта, проекции фасонного резца, шаги графического профилирования, шаги аналитического профилирования.

Введение

Для возможности автоматизации и сокращения времени расчёта фасонных резцов с базовой линией предлагается новый способ расчёта фасонных резцов графическим и аналитическим профилированием.

Новый способ графического профилирования круглого фасонного резца с заточкой передней поверхности под углами $\varepsilon_p > 0$ и $\varepsilon_B = \varepsilon_{np} > 0$ и радиальной подачей (с базовой линией) для наружной обработки.

Описание теоретических исследований

Графическое профилирование фасонных резцов с базовой линией отсутствует в литературе по режущему инструменту и, в частности, по фасонным резцам [1 – 3]. В [4, 5] приведён коррекционный расчёт профиля фасонного резца, который основан на определении радиусов узловых точек фасонного резца через проекции между узловыми точками на горизонтальной плоскости. При этом расчётная схема не является унифицированной, но строго индивидуальной для каждого профиля детали, что не позволяет составить единый алгоритм расчёта и автоматизировать расчёт. Разработан способ графического и коррекционного аналитического расчёта фасонных резцов с базовой линией. Особенностью предлагаемого способа расчёта фасонных резцов с базовой линией является системность и возможность автоматизации расчётов. Графическое профилирование является простым, наглядным и легко усваиваемым.

При новом способе графического профилирования рассматриваются три проекции фасонного резца в рабочем положении и один вид по стрелке К, направленной под углом γ (передний угол), к горизонтальной плоскости в плоскости, перпендикулярной оси заготовки, вдоль передней поверхности (рисунок 1).

На фронтальной проекции $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ – радиусы узловых точек детали, пронумерованные, начиная с наименьшего радиуса. Радиусы R_3 и R_6 ограничивают конический участок детали.

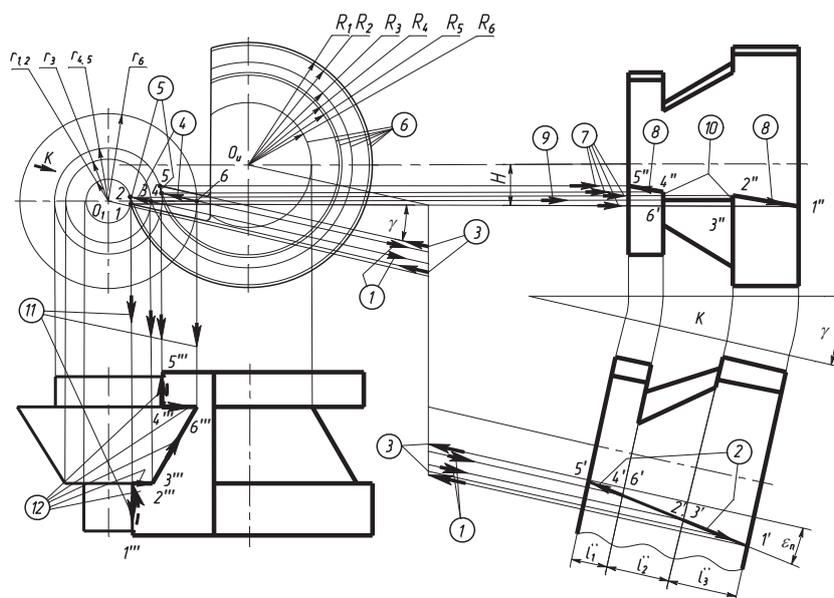


Рис. 1. Графическое профилирование круглого фасонного резца с базовой линией новым авторским способом

Для графического профилирования необходимо сначала нанести базовую линию на фронтальной проекции схемы профилирования (рис. 1, линия 3 – 6, лежащая в горизонтальной плоскости, проходящей через ось детали, совпадающая с образующей конуса детали). После этого начинается графическое профилирование фасонного резца. Для систематизации графическое профилирование разбито на 12 шагов.

Первый шаг. Находятся точки $3'$ и $6'$, ограничивающие базовую линию, на виде К. Для этого из точек 3 и 6 на фронтальной проекции под углом γ (по стрелке К) проводятся линии со стрелками, обозначенными цифрами 1 в круге, до получения точек $3'$ и $6'$ на виде К при пересечении линий со стрелками 1 с границами ступеней детали.

Второй шаг. Отрезок $3'-6'$ продолжается в обе стороны (вправо и влево на виде К) до получения крайних точек лезвия фасонного резца $1'$ и $5'$. Полученный отрезок $1'-5'$ (прямая линия) – проекция сложного лезвия фасонного резца на виде К, совпадающая со следом передней поверхности резца на перпендикулярной к передней поверхности плоскости. Точки $1', 2', 3', 4', 5', 6'$ – точки, полученные при пересечении передней поверхности соответствующих границ ступеней профиля фасонного резца. Это узловые точки на виде К. Линии второго шага графического профилирования обозначены стрелками с цифрами 2 в круге на виде К. Положение точек $3'$ и $6'$ определяет угол ϵ_{np} – угол наклона передней поверхности вдоль оси фасонного резца с базовой линией. Угол $\epsilon_n = \epsilon_{np}$ определён графически и уточняется аналитически при коррекционном расчёте профиля резца.

Третий шаг. Из точек 1' и 5' проводятся линии, параллельные линиям со стрелками 1, в обратном направлении, до пересечения с окружностями, проведенными через соответствующие узловые точки, до получения точек 1 и 5 на фронтальной проекции схемы профилирования. Третий шаг обозначен линиями и стрелками с номером 3 в круге.

Четвёртый шаг. Через точки 3 и 6 на фронтальной проекции проводятся линии, параллельные линиям, обозначенным номерами 1 и 3 (под углом γ) до пересечения с окружностями радиусами $r_{1,2}$ и $r_{4,5}$ до получения точек 2 и 4. Эти две линии и стрелки обозначены цифрами 4 в круге.

Пятый шаг. Точки 1 и 2 и 4 и 5 соединяются дугами окружностей соответственно радиусами $r_{1,2}$ и $r_{4,5}$. После пятого шага получена проекция сложной режущей кромки 1-2-3-6-4-5 фасонного резца на фронтальной плоскости. Пятый шаг обозначен цифрами 5 в круге.

Шестой шаг – определение радиусов фасонного резца. Минимальный наружный радиус фасонного резца определяется в зависимости от глубины профиля детали (Δr_i) согласно [2, 3]. Конструктивно наружный радиус фасонного резца (R1) может быть увеличен для улучшения соотношений его параметров. После определения R1 находится центр фасонного резца на линии, лежащей на величину H выше оси детали – O_u . Расстояние от O_u до точек 2, 3, 4, 5, 6 определяется графически с учётом масштаба увеличения и проводятся окружности радиусами R1, R2, R3, R4, R5, R6. Шестой шаг обозначается цифрами 6 в круге. Остальные шаги преследуют цель построения остальных проекций режущих кромок фасонного резца.

Седьмой шаг. Из точек 1, 2, 4, 5, фронтальной проекции проводятся горизонтальные линии для определения точек 1'', 2'', 4'', 5'' на фронтальной проекции путём пересечения линий со стрелками 7 в круге с границами соответствующих ступеней фасонного резца.

Восьмой шаг. Точка 1'' соединяется с точкой 2'', точка 4'' соединяется с точкой 5'' – получены лезвия 1''-2'' и 4''-5'' крайних ступеней фасонного резца. Восьмой шаг построения отмечен стрелками с цифрами 8 в круге.

Девятый шаг. Из точек 3 и 6 на фронтальной проекции проводятся горизонтальные линии (совмещаются в одну) для получения отрезка 3'' – 6'' (проекция базовой линии на фронтальной плоскости). Линия девятого шага помечена цифрой 9 в круге с двумя стрелками из-за совмещения двух линий.

Десятый шаг. Соединяются точки 4'' и 6'', 2'' и 3''. Получена проекция сложной режущей кромки фасонного резца на фронтальной плоскости: 1''-2''-3''-6''-4''-5''. Десятый шаг (проведение линий 4''-6'' и 2''-3'') обозначен цифрой 10 в круге.

Одиннадцатый шаг. Из точек 1, 2, 3, 4, 5, 6, на фронтальной проекции проводятся вертикальные линии, обозначенные цифрами 11 в круге, до пересечения с узловыми точками проекции резца на горизонтальной плоскости и находятся точки 1''', 2''', 3''', 4''', 5''', 6''' сложной режущей кромки фасонного резца на его горизонтальной проекции.

Двенадцатый шаг. Соединяются точки 1''' и 2''', 2''' и 3''', 3''' и 6''', 4''' и 5''' линиями со стрелками, обозначенными цифрой 12 в круге. Получена проекция режущей кромки фасонного резца на его горизонтальной проекции: 1'''-2'''-3'''-6'''-4'''-5'''.

Режущей кромке фасонного резца в плоскости передней поверхности с наклоном $\varepsilon_B = \varepsilon_{пр}$ относительно образующей цилиндра детали (горизонтальной плоскости), соответствует линия эллипса (сечение цилиндра наклонной плоскостью). Режущая кромка фасонного резца должна быть в этом сечении эллиптической, вогнутой. Для обеспечения этих условий в зоне резания и получения заданного цилиндра на детали окончательное профилирование фасонного резца должно быть осуществлено дисковым (пальцевым) шлифованным кругом с радиусом, равным радиусу цилиндрического участка детали, с установкой оси шлифовального круга относительно передней поверхности фасонного резца под углом $\varepsilon_B = \varepsilon_{пр}$. В этом случае наиболее просто обеспечивается теоретическая точность обработки и не вносится погрешность. Однако не всегда удаётся подобрать шлифовальный круг заданного диаметра (радиуса). Поэтому другой способ получения формы режущей кромки лезвия фасонного резца заключается в шлифовании фасонного резца дисковым кругом любого диаметра, **спрофи**

лированного в соответствии с расчётом, что теоретически исключает погрешность способа профилирования.

При расчёте фасонного резца на режущей кромке выбирается ряд точек с определённым шагом между ними вдоль оси резца (детали). Для этих точек рассчитываются соответствующие радиусы фасонного резца по предложенному ниже способу для узловых точек 1, 2, 4 и 5.

Оценка точности графического профилирования. При использовании чертёжного прибора можно гарантировать точность графических построений в пределах 1 мм. Для увеличения точности используется наиболее возможный масштаб увеличения. При масштабе 20:1 точность определяемых радиусов находится в пределах 1 мм: 20 = 0,05 мм. При масштабе 10:1 – соответственно 1 мм: 10 = 0,1 мм. В ряде случаев этой точности может быть достаточно. Если точность, достигаемая графическим профилированием, недостаточна, то необходимо выполнить аналитический расчёт профиля.

Аналитический (коррекционный) расчёт профиля круглого фасонного резца с базовой линией новым авторским способом. После выполнения графического профилирования (или без него) строится расчётная схема для аналитического расчёта фасонного резца.

Для наглядности расчёта и облегчения его автоматизации он разбивается на семь шагов (этапов) – рисунки 2 и 3.

Первый шаг. Определение **проекций расстояний** от узловых точек профиля фасонного резца на передней поверхности до осевой плоскости детали, параллельной передней поверхности, и **проекций расстояний** между узловыми точками на осевую плоскость фасонного резца, перпендикулярную направлению радиальной заточки передней поверхности (рисунок 2).

Проекция **1 - 2** = $1' - 2' = 1' - 3' = L_3 - 3' = l_3'' \operatorname{tg} \varepsilon_{\text{п}}$;

Проекция **2' - 4'** = $3' - 4' = 2' - 6' = 3' - 6' = L_4 - 6' = l_2'' \operatorname{tg} \varepsilon_{\text{п}}$;

Проекция **4' - 5'** = $6' - 5' = L_5 - 5' = l_1'' \operatorname{tg} \varepsilon_{\text{п}}$;

Проекция **D₃ - 3** = $D_2 - 2 = O_1' - 3' = O_1' - 2' = r_3 \sin \gamma$;

Проекция **D₁ - 1** = $O_1' - 1' = (O_1' - 2') - (1' - 2') = (O_1' - 3') - (1' - 3') = r_3 \sin \gamma - l_3'' \operatorname{tg} \varepsilon_{\text{п}}$;

Проекция **D₅ - 5** = $O_1' - 5' = (1' - 5') + (O_1' - 1') = (L_3 - 3') + (L_4 - 4') + (L_5 - 5') + (r_3 \sin \gamma - l_3'' \operatorname{tg} \varepsilon_{\text{п}}) = (l_1'' + l_2'' + l_3'') \operatorname{tg} \varepsilon_{\text{п}} + r_3 \sin \gamma - l_3'' \operatorname{tg} \varepsilon_{\text{п}} = (l_1'' + l_2'') \operatorname{tg} \varepsilon_{\text{п}} + r_3 \sin \gamma$;

Проекция **D₄ - 4** = $D_6 - 6 = (O_1' - 1') + (1' - 4') = (O_1' - 1') + (1' - 6') =$

$= r_3 \sin \gamma - l_3'' \operatorname{tg} \varepsilon_{\text{п}} + (l_3'' + l_2'') \operatorname{tg} \varepsilon_{\text{п}} = r_3 \sin \gamma + l_2'' \operatorname{tg} \varepsilon_{\text{п}}$ или **D₆ - 6** = $r_6 \sin \gamma$, что проще;

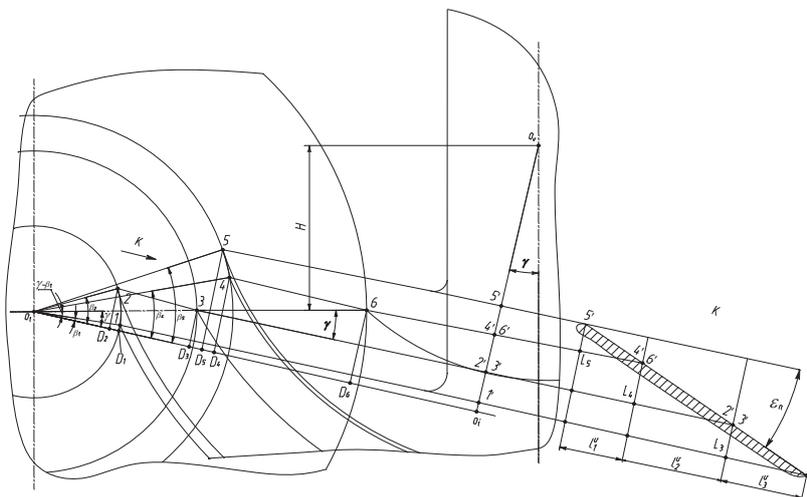


Рис. 2. Расчётная схема аналитического профилирования круглого фасонного резца с базовой линией новым авторским способом с промежуточными линейными и угловыми расчётными параметрами

Проекция $E_r - 5' = (E_r - 4') - (4' - 5') = (E_r - 6') - (5' - 6') = B_6 \operatorname{tg} \gamma - (4' - 5') =$
 $= B_6 \operatorname{tg} \gamma - (5' - 6') = B_6 \operatorname{tg} \gamma - \ell_1'' \operatorname{tg} \varepsilon_n.$

$\ell_1'', \ell_2'', \ell_3''$ – осевые размеры профиля фасонного резца; на крайних ступенях следует учесть дополнительные режущие кромки.

Проекция $E_r - 5' = (E_r - 4') - (4' - 5') = (E_r - 6') - (5' - 6') = B_6 \operatorname{tg} \gamma - (4' - 5') =$
 $= B_6 \operatorname{tg} \gamma - (5' - 6') = B_6 \operatorname{tg} \gamma - \ell_1'' \operatorname{tg} \varepsilon_n.$

$\ell_1'', \ell_2'', \ell_3''$ – осевые размеры профиля фасонного резца; на крайних ступенях следует учесть дополнительные режущие кромки.

Примечание: размер B_6 смотри в пункте «Пятый шаг».

Таким образом, проекции указанных расстояний на фронтальной плоскости для узловых точек, не лежащих на базовой линии, определяются через осевые размеры и угол наклона передней поверхности ε_n вдоль оси резца. Указанные же проекции для узловых точек, лежащих на базовой линии, определяются через их радиусы (детали) и передний угол γ .

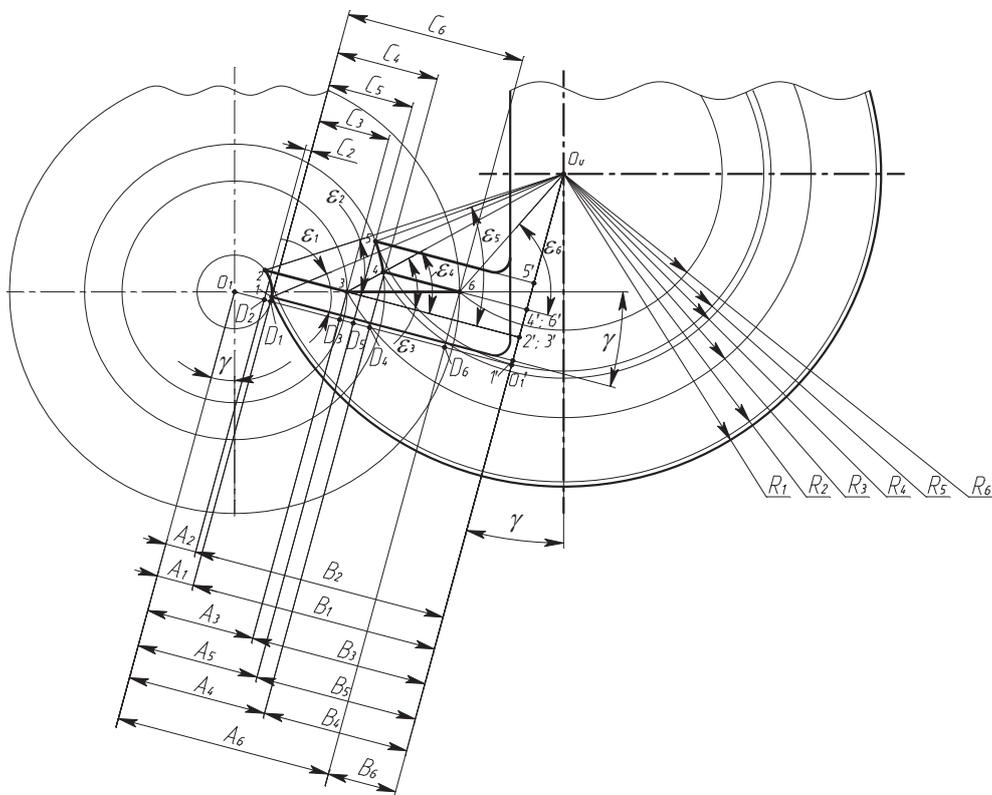


Рис. 3. Аналитическое профилирование круглого фасонного резца с базовой линией новым авторским способом – промежуточные размеры A_i , C_i , B_i и искомые радиусы резца R_i

Второй шаг. Определение промежуточных угловых параметров β_i (рис. 2) для расчёта вспомогательных размеров A_i (рис. 3).

$$\sin \beta_1 = (D_1 - 1)/r_1 = (O_1' - 1')/r_1 = (r_3 \sin \gamma - \ell_3'' \operatorname{tg} \varepsilon_n)/r_1;$$

$$\sin \beta_2 = (D_2 - 2)/r_2 = (O_2' - 2')/r_2 = (r_3 \sin \gamma)/r_2;$$

Угловые параметры для точек базовой линии: $\beta_3 = \gamma$, $\beta_6 = \gamma$;

$$\sin \beta_4 = [(D_4 - 4) = (D_6 - 6) = (O_1' - 4')]/r_4 = (r_3 \sin \gamma + \ell_2'' \operatorname{tg} \varepsilon_n)/r_4;$$

$$\sin \beta_5 = [(D_5 - 5) = (O_1' - 5')]/r_5 = (r_3 \sin \gamma + (\ell_1'' + \ell_2'') \operatorname{tg} \varepsilon_n)/r_5;$$

Третий шаг. Определение вспомогательных линейных параметров A_i (рисунок 3).

$$A_1 = r_1 \cos \beta_1; A_2 = r_2 \cos \beta_2; A_3 = r_3 \cos \gamma; A_4 = r_4 \cos \beta_4; A_5 = r_5 \cos \beta_5;$$

$$A_6 = r_6 \cos \gamma.$$

Четвёртый шаг. Определение вспомогательных линейных параметров C_i .

$$C_2 = A_1 - A_2 = r_1 \cos \beta_1 - r_2 \cos \beta_2;$$

$$C_3 = A_3 - A_1 = r_3 \cos(\beta_3 = \gamma) - r_1 \cos \beta_1; C_4 = A_4 - A_1 = r_4 \cos \beta_4 - r_1 \cos \beta_1;$$

$$C_5 = A_5 - A_1 = r_5 \cos \beta_5 - r_1 \cos \beta_1; C_6 = A_6 - A_1 = r_6 \cos(\beta_6 = \gamma) - r_1 \cos \beta_1.$$

Пятый шаг. Определение вспомогательных линейных параметров B_i . Для этого определяется наименьший наружный радиус фасонного резца $R_i = f(\Delta r_i)$ как функция глубины профиля на детали. При необходимости он может быть увеличен.

$$B_1 = R_1 \cos \varepsilon_1; B_2 = B_1 + C_2; B_3 = B_1 - C_3; B_4 = B_1 - C_4; B_5 = B_1 - C_5; B_6 = B_1 - C_6.$$

Шестой шаг. Определение вспомогательных угловых параметров ε_i .

$$\sin \varepsilon_1 = (O_u - 1')/R_1; \text{ или } \operatorname{tg} \varepsilon_1 = (O_u - 1')/B_1; \quad \varepsilon_1 = \arcsin[(O_u - 1')/R_1];$$

$$\varepsilon_1 = \arcsin[(O_u - 1')/R_1];$$

$$\varepsilon_1 = \arcsin[(O_u - 1')/R_1];$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon_2 = [(O_u - 1') - (1' - 2')]/B_2 = (O_u - 2')/B_2; \quad \varepsilon_2 = \arcsin[(O_u - 2')/B_2];$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon_3 = [(O_u - 3') - (O_u - 2')]/B_3 = (O_u - 3')/B_3; \quad \varepsilon_3 = \arcsin[(O_u - 3')/B_3];$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon_4 = [(O_u - 1') - (1' - 4')]/B_4 = (O_u - 4')/B_4; \quad \varepsilon_4 = \arcsin[(O_u - 4')/B_4];$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon_5 = [(O_u - 1') - (1' - 5')]/B_5 = (O_u - 5')/B_5; \quad \varepsilon_5 = \arcsin[(O_u - 5')/B_5];$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon_6 = [(O_u - 1') - (1' - 6')]/B_6 = (O_u - 6')/B_6; \quad \varepsilon_6 = \arcsin[(O_u - 6')/B_6];$$

Седьмой шаг. Определение радиусов узловых точек профиля фасонного резца R_i .

R_1 выбирается в зависимости от глубины профиля детали.

$$R_2 = B_2 / \cos \varepsilon_2; R_2 = [(O_u - 1') - (1' - 2')]/\sin \varepsilon_2 = (O_u - 2')/\sin \varepsilon_2;$$

$$R_3 = B_3 / \cos(\varepsilon_3 = \gamma); R_3 = (O_u - 3')/\sin \varepsilon_3;$$

$$R_4 = (O_u - 4')/\sin \varepsilon_4 = [(O_u - E_r) + (E_r - 4')]/\sin \varepsilon_4 = B_4 / \cos \varepsilon_4;$$

$$R_5 = (O_u - 5')/\sin \varepsilon_5 = [(O_u - E_r) + (E_r - 5')]/\sin \varepsilon_5 = B_5 / \cos \varepsilon_5;$$

$$R_6 = (O_u - 6')/\sin \varepsilon_6 = [(O_u - E_r) + (E_r - 6')]/\sin \varepsilon_6 = B_6 / \cos \varepsilon_6;$$

Все параметры резца рассчитаны.

Результаты и обсуждение

Таким образом, получено графическое профилирование и рассчитаны параметры – двенадцать шагов; коррекционное аналитическое профилирование круглого фасонного резца – семь шагов.

В отличие от существующей методики индивидуального профилирования, в зависимости от фасонного профиля детали предложена методика, которая систематизирует графический расчёт и позволяет применить унифицированный подход и легко автоматизировать расчёт.

Выводы

1. Разработан простой и наглядный способ графического и коррекционного аналитического расчёта круглых фасонных резцов с базовой линией.
2. Графическое профилирование круглого фасонного резца состоит из двенадцати этапов.
3. Коррекционное аналитическое профилирование круглого фасонного резца включает семь шагов.
4. Особенность предлагаемого способа расчёта круглых фасонных резцов с базовой линией заключается в системности и унифицированном подходе.
5. Способ позволяет уменьшить трудоёмкость расчёта круглых фасонных резцов с базовой линией.
6. Разработанный способ графического и коррекционного аналитического расчёта круглых фасонных резцов с базовой линией позволит легко автоматизировать расчёт.

Список литературы

- 1 Схиртладзе А.Г., Чупина Л.А., Пульбере А.И., Гречишников В.А. Формообразующие инструменты в машиностроении /– М. : Новое знание, 2006. – 557 с.
- 2 Кишуров В.М., Черников П.П. Проектирование режущего инструмента в машиностроении. – М. : Издательство МАИ, 2006. – 159 с.
- 3 Фельдштейн, Е.Э. Режущий инструмент / – Минск : Новое знание, 2007. — 400 с.
- 4 Грановский Г.И., Панченко К.П. Фасонные резцы. – М.: Машиностроение, 1979. – 308 с.
- 5 Смирнов М.Ю. Расчет и проектирование фасонных резцов / М.Ю. Смирнов, Г.И. Киреев, В.В. Демидов. Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 77 с.

THE ROUND SHAPED CUTTERS PROFILE CALCULATION

Dudak N.S., C.Sc. (Engineering), associate professor

Kasenov A.Zh., C.Sc. (Engineering), e – mail: asylbek_kasenov@mail.ru

Itybayeva G.T., C.Sc. (Engineering), e – mail: galia-itibaeva@mail.ru

Mussina Zh.K., C.Sc. (Engineering), e – mail: mussina_zhanara@mail.ru

S. Toraighyrov Pavlodar State University, Lomov St. 64, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan

Abstract

Graphical and analytical new methods of round shaped cutters with the baseline were calculated. In comparison with existing methods of individual profiling, depending on the style profile details the technique that classifies graphical calculation allows you to apply a unified approach and automate the calculation easily.

A simple and visual way of graphical and analytical calculation of the correction of round shaped cutters with baseline is developed: graphic profiling of a round shaped cutter consists of twelve stages; correctional analytical profiling of a round shaped cutter includes seven steps.

Keywords: round shaped cutter, baseline, graphic profiling, analytical profiling, the new method of calculation, the automation of the calculation, projection, anchor points, algorithm, projections shaped cutters, graphical steps profiling, analytical steps profiling.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИТА

*МАРКОВ А. М.¹, доктор техн. наук, профессор,
СЧИГГЕЛ НОРБЕРТ,² доктор техн. наук, профессор
(¹АлтГТУ, г. Барнаул, Россия,*

²Ченхостовский технологический университет, г. Ченстохова, Польша)

Марков А.М. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова,
e – mail: andmarkov@inbox.ru

Счигёл Норберт – 42 – 201, г. Ченстохова, ул. Домбровского 73,
Ченхостовский технологический университет,
e – mail: norbert.sczygiol@icis.pcz.pl

Аннотация

Приведены результаты исследования формирования показателей точности при обработке концевыми фрезами заготовок из такого композиционного материала как стеклопластик. Описаны особенности механической обработки композиционных материалов, в частности, подробно описан процесс износа режущих лезвий фрезы. Построена имитационная модель удаления материала и износа инструмента с использованием метода конечных элементов в системе Ansys. На основе моделирования установлены зависимости величины износа режущего лезвия фрезы от эквивалентов напряжений и силы резания. Адекватность результатов моделирования реальному процессу подтверждена экспериментальными исследованиями. Полученные результаты могут найти применение в автоматизированных системах проектирования операций концевой фрезерования, например, при расчете режимов резания и выборе конструктивно-геометрических параметров режущего инструмента.

Ключевые слова: показатели качества, композиционный материал, концевая фреза, износ, метод конечных элементов, сила резания, напряжения, параметры режимов резания.

Введение

Широкое распространение композиционных материалов, в частности, стеклопластиков в таких отраслях промышленности как производство ракетно-космической и авиационной техники, в судо – и автомобилестроении связано их уникальными физико-механическими параметрами. В первую очередь это высокая прочность, низкая теплопроводность, хорошие электроизоляционные свойства. Себестоимость получения стеклопластиков относительно невысока. При этом наличие в составе композита эпоксидной матрицы и армирующего компонента в виде стекловолокна обуславливает возникновение ряда проблем при механической обработке [1, 2]. В их числе сложность достижения заданных показателей качества из-за повышенного износа режущего инструмента. В работах отечественных и зарубежных исследователей [3 – 5] отмечается, что характер износа инструмента при обработке композитных материалов может существенно отличаться от изнашивания инструмента при резании металла. На первом этапе (до 0,2 – 0,25 мм) происходит округление режущего лезвия, затем начинается интенсивный износ по площадке контакта задней поверхности инструмента с обрабатываемым материалом, чему способствует явление упругого восстановления обработанной поверхности композиционного материала. При этом из-за относительно малых сил резания передняя поверхность практически не изнашивается. Величина износа определяется физико-механическими свойствами конкретного композиционного материала и условиями обработки (режимы резания, конструктивно-геометрические параметры режущего инструмента) и на этапе прогнозирования выходных парамет-

ров качества при проектировании технологических операций наиболее эффективно может быть определена в процессе математического моделирования, например, с использованием метода конечных элементов [6]. Ниже представлены результаты математического моделирования износа концевой фрезы при обработке композиционного материала стеклопластик с использованием системы Ansys.

Методика исследований

При построении модели процесса резания рассматривается трехмерная схема контактного взаимодействия обрабатываемого материала и режущего лезвия инструмента. При этом учитывается совместное проявление следующих факторов: пластические деформации в заготовке и тепловые явления на ее поверхности, стружкообразование, износ инструмента.

Материал режущего лезвия – твердый сплав ВК8, композитный материал состоит из эпоксидной матрицы, армированной стекловолокнами. Физико-механические свойства составляющих компонентов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства компонентов композиционного материала

| Свойства | Значения для составляющих компонентов | |
|--|---------------------------------------|------------------------|
| | стекловолокно | эпоксидная смола ЭД-20 |
| Модуль упругости, МПа | 82000 | 3500 |
| Коэффициент Пуассона | 0,25 | 0,2 |
| Плотность, кг/м ³ | 2500 | 1250 |
| Прочность при растяжении, МПа | 4200 | 70 |
| Коэффициент линейного термического расширения, 10 ⁻⁶ (1 / °С) | 4,3 | 6 |

Для построения 3D-модели системы «Заготовка – лезвие фрезы» использовалась среда автоматизированного проектирования «Компас – 3D». При моделировании чернового, получистового и чистового видов фрезерования приняты разные масштабы для построения моделей. При чистовом фрезеровании (глубина резания от 0,2 мм до 0,5 мм) заготовка представляла собой куб с гранями 1 мм, с размещенными в нем волокнами диаметром 0,007 мм, расстояние между волокнами 0,04 мм. Режущее лезвие имело следующие размеры: высота – 0,5 мм, ширина – 0,5 мм, длина – 1,2 мм. Передний угол –15°, задний – 20°. При получистовом и черновом фрезеровании (глубина резания от 1 до 5 мм) заготовка – куб с гранями 5 мм. Режущее лезвие: высота – 5,5 мм, ширина – 5 мм, длина – 5,5 мм. Для каждого из видов фрезерования рассматриваются три состояния режущего лезвия – острозаточенное (новое), имеющее нормальный износ, достигшее предельного износа. Состояние режущего лезвия задается в модели радиусом при вершине: 0,05; 0,2; 0,3 мм соответственно. Скорость резания изменялась от 70 до 628 м/мин.

В основу расчета положен так называемый явный динамический анализ, базирующийся на численном решении системы дифференциальных уравнений механики сплошной среды [7]. Расчет реализован в пакете ANSYS – Workbench (ExplicitDynamic), позволяющем решать контактные задачи с физической и геометрической нелинейностями.

Ответственным этапом разработки имитационной модели, который определяет качество и точность расчетов, является построение сетки: выбор типа конечных элементов и их размеров. В работе [8] указано, упорядоченная сетка с прямоугольными элементами является наиболее предпочтительной в данном случае. В связи с тем, что объектом моделирования является процесс резания ком-

позиционного материала, характеризуемый большим градиентом деформаций, наличием концентраторов напряжений в виде трещин, неоднородностей, разрывов связей в материале, то для заготовки в зоне резания была выбрана мелкая сетка с размером 0,025 мм. Для режущего лезвия использовалась сетка 0,003 мм. С целью уменьшения времени расчета для остального материала выбрана сетка 0,15 мм.

Для расчетной схемы (рис. 1а) по двум поверхностям заготовки принято условие неподвижности узлов; инструменту задается перемещение в направлении главного движения резания (рис. 1б).

При моделировании приняты следующие допущения:

- 1) перемещение лезвия фрезы от движения подачи не учитывается, рассматривается только перемещение, вызванное главным движением;
- 2) моделируется процесс резания на малом участке заготовки поэтому главное движение лезвия фрезы по окружности заменяются прямолинейным перемещением;
- 3) стеклопластик рассматривается как объект, состоящий из двух материалов без пограничной фазы.

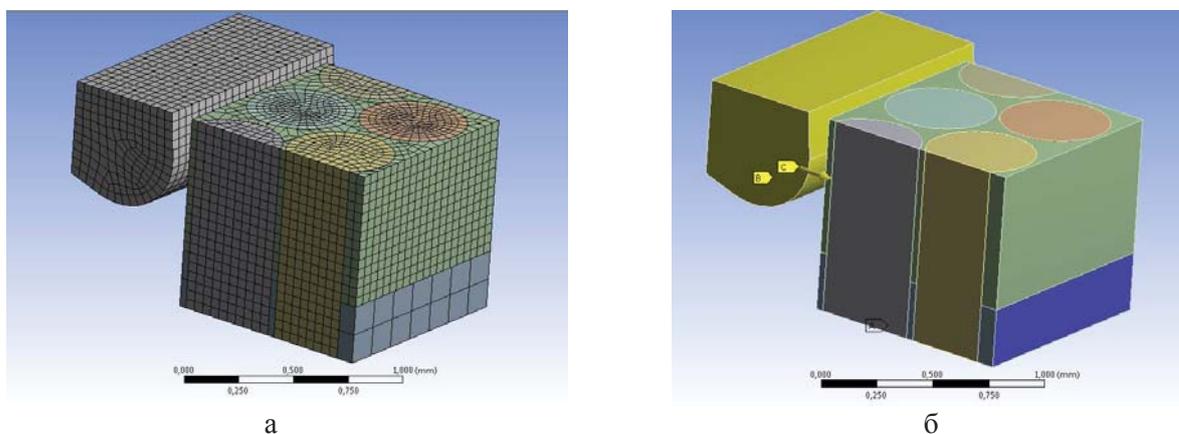


Рис. 1. Расчетная схема:

а) исходная модель; б) схема взаимодействия инструмента и заготовки

Результаты и обсуждение

Моделирование процесса резания стеклопластика выявило места основных напряжений в режущем лезвии (рис. 2). Наибольшие напряжения, которые приводят к интенсивному износу режущей кромки инструмента, возникают в местах перерезания стекловолокна. Кроме того было зафиксировано, что при резании изношенным инструментом (радиус при вершине 0,3 мм) стекловолокно разрывается и отслаивается от матрицы.

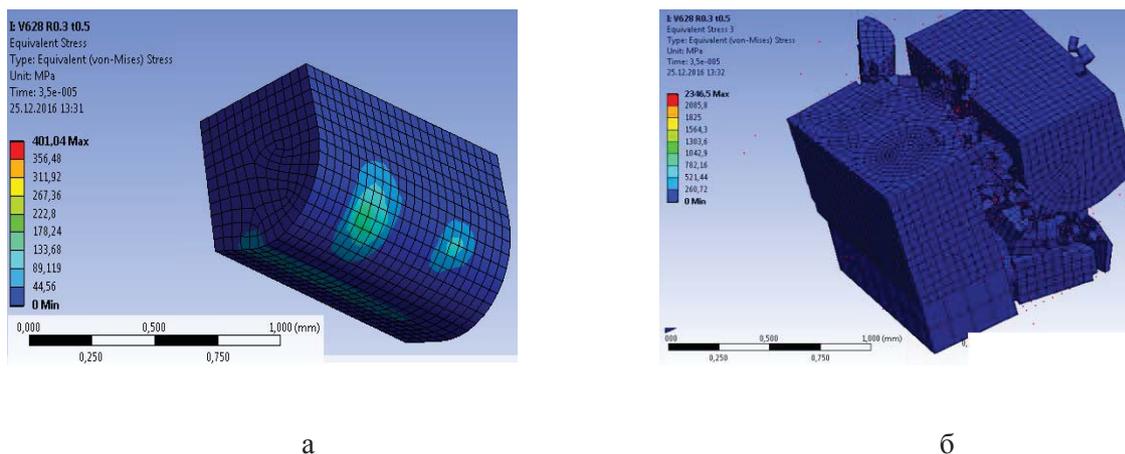


Рис. 2. Результаты моделирования:
а – напряжения, возникающие на лезвии фрезы;
б – взаимодействие инструмента и заготовки

Обработка результатов, полученных при моделировании, позволила установить характер зависимости силы резания от износа инструмента и скорости резания для черного, получистового и чистового видов фрезерования. Зависимость имеет линейный характер и в общем виде может быть представлена следующим выражением:

$$P_{\Sigma} = a + k\Delta, \tag{1}$$

где P_{Σ} - эквивалентная сила резания, Н;

Δ – значение износа режущего лезвия, мкм;

a, k – коэффициенты, зависящие от вида обработки. Значения коэффициентов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов для расчета силы резания

| Скорость резания, м/мин | Значения коэффициентов | |
|---|------------------------|-------|
| | a | k |
| черновое фрезерование ($t = 5$ мм) | | |
| 70 | 11,18 | 2582 |
| 200 | 14,73 | 2670 |
| 628 | 8,3 | 3476 |
| получистовое фрезерование ($t = 1$ мм) | | |
| 70 | 3,9 | 1313 |
| 200 | 19,81 | 1577 |
| 628 | 78,1 | 2155 |
| чистовое фрезерование ($t = 0,2$ мм) | | |
| 70 | 4,3 | 563,5 |
| 200 | 0,7 | 935,2 |
| 628 | 21,18 | 862,6 |

Для оценки адекватности результатов моделирования реальному процессу износа был проведен ряд экспериментов по фрезерованию стеклопластика [9]. Использовались концевые фрезы диаметром 10 мм из твердосплавного материала марки ВК8. В качестве экспериментального образца выбраны трубы из высокопрочного стеклопластика, полученные методом косослойной продольно-поперечной намотки.

Варьируемыми параметрами приняты режимы резания: скорость резания (V , м/мин), подача (S , мм/зуб) и глубина фрезерования (t , мм). В процессе экспериментов контролировали износ инструмента (Δ , мкм), силу резания (P , Н), шероховатость обработанной поверхности (R_a , мкм). Измерение силы резания осуществлялось с помощью оригинального многокомпонентного динамометра (положительное решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 2016145705/28 от 22.11.2016).

Как показали экспериментальные исследования, основной причиной выхода из строя режущего инструмента является износ по задней поверхности, при этом наблюдается выкрашивание режущей кромки (рис. 3). Помимо этого при работе изношенным инструментом ухудшается качество обработанной поверхности: увеличивается шероховатость, появляется отслоение волокон от матрицы стеклопластика (рис. 4).

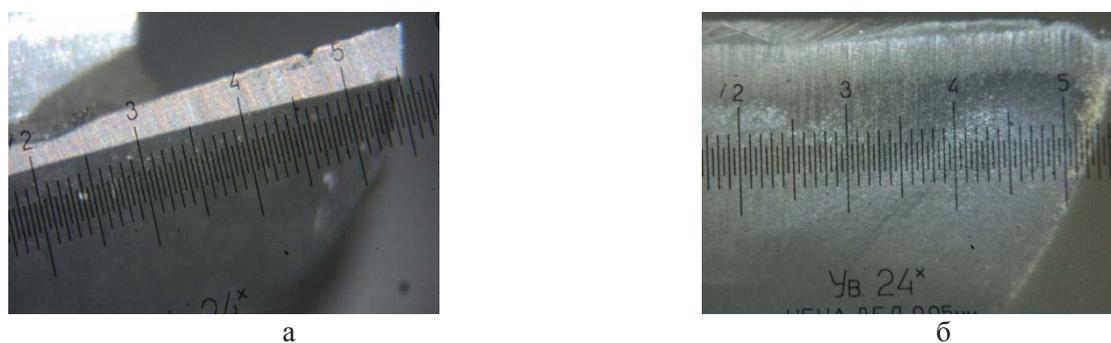


Рис. 3. Режущее лезвие фрезы:

а – новая фреза; б – фреза, достигшая предельный износ по задней поверхности 0,3 мм

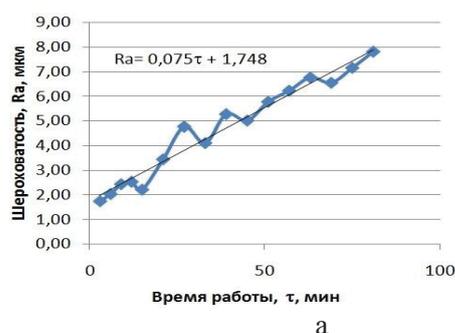


Рис. 4. Качество обработанной поверхности

а – изменение шероховатости; б - дефекты поверхностного слоя

Полученные в ходе эксперимента результаты подтвердили линейную зависимость силы резания от износа инструмента. Значения силы резания для всех видов фрезерования совпадают с результатами моделирования. В качестве примера на рис. 5 показаны экспериментальные и расчетные значения силы резания для режима полустачного фрезерования. Аналогичные графики получены для чернового и чистового видов фрезерования. Несовпадение экспериментальных и расчетных значений не превышает 10%, что свидетельствует об адекватности разработанной модели реальному процессу.

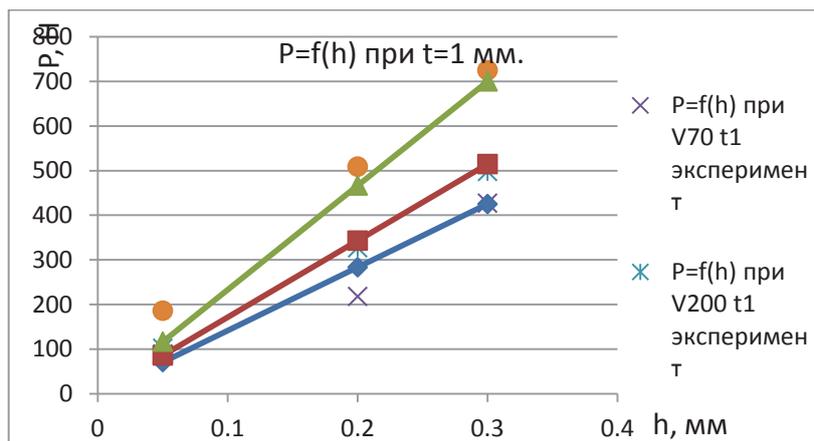


Рис. 5. Зависимость изменения силы резания от износа фрезы

Выводы

1. Разработанная имитационная модель процесса фрезерования стеклопластика позволяет прогнозировать величину и характер износа режущего инструмента. Вне зависимости от вида фрезерования (черновое, получистовое, чистовое) и режимов резания превалирующим видом износа режущего инструмента является износ по задней поверхности.

2. Моделирование подтвердило, что наибольшие по величине напряжения, приводящие к интенсивному износу режущего лезвия инструмента, возникают в момент перерезания стекловолокон. В ряде случаев это приводит к выкрашиванию режущего лезвия инструмента.

3. При фрезеровании изношенным инструментом в большинстве случаев происходит не сревание, а разрыв стекловолокна и его отслоение от матрицы, обуславливающие увеличение шероховатости и разлохмачивание обработанной поверхности.

4. Сила резания при фрезеровании стеклопластика имеет линейную зависимость от износа инструмента. Полученные математические зависимости позволяют рассчитать ее значение в зависимости от скорости резания и износа для чернового, получистового и чистового видов фрезерования.

5. Экспериментальное исследование подтвердило адекватность имитационной модели реальному процессу, что позволяет использовать ее при проектировании операции фрезерования для назначения режимов резания.

Список литературы

1. Макаров В.Ф., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В. Исследование процессов механической обработки деталей авиационно-космической техники из новых композиционных материалов// Новые материалы и технологии в машиностроении. 2015. № 22. С. 14 – 22.
2. Мозговой Н.И., Марков А.М. Исследование процесса формирования показателей качества отверстий в деталях из стеклопластика// Ползуновский вестник. 2009. № 2. С. 23.
3. Степанов А. А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. -176 е., ил.
4. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. Кн 1/Под ред. Дж. Любина; Пер. с англ. А.Б. Геллера, М.М. Гельмонта; Под ред. Б.Э. Геллера. - М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.; ил.
5. Мешкас А.Е., Макаров В.Ф., Ширинкин В.В. Технологии, позволяющие повысить эффективность обработки композиционных материалов методом фрезерования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-2. С. 291 – 299.

6. Leonov S.L., Markov A.M., Belov A.B., Sczygol N. Generalized mathematical model predicting the mechanical processing topography // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 7. Сер. "VII International Scientific and Practical Conference on Innovations in Mechanical Engineering, ISPCIME 2015" 2016. С. 012009.
7. Щуров И.А., Болдырев И.С. Моделирование процесса резания заготовок из композитных материалов с применением метода конечных элементов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. 2012. №12 (271). С.143 – 147.
8. Болотеин А.Н. Анализ напряженно-деформированного состояния деталей после механической обработки средствами компьютерного моделирования. // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2014. № 1 (28). С. 54-60.
9. Гайст С.В., Катаева С.А., Марков А.М., Черданцев П.О., Лапенков Е.Ю. Экспериментальное исследование процесса формирования показателей качества при фрезеровании стеклопластика //Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 3 (51). С. 129 – 136.

QUALITY ASSURANCE OF PARTS PRODUCTION FROM COMPOSITES

Markov A.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: andmarkov@inbox.ru

Norbert sczygiol, D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: norbert.sczygiol@icis.pcz.pl

FSAEI HE Polzunov Altai State Technical University, 656038, Russian Federation, Altai region, Barnaul, Lenina avenue, 46

Czestochowa University of Technology, 73 ul. J. H. Dąbrowskiego, Częstochowa, 42 – 201, Polska

Abstract

The results of the research of formation of indicators of accuracy in processing end mill workpiece made of a composite material such as fiberglass. The wear mechanism of the cutting blades of the end mill has been studied in detail. Describes a simulation model of material removal and tool wear by means finite element method. Used the Ansys system. Based on modeling got the dependence of the wear amount of the cutting blade of the cutter from the equivalent stresses and cutting forces. The adequacy of simulation results to the real process was confirmed by experimental studies. The obtained results can find application in automated systems design operations in end milling, for example, when calculating the cutting conditions and the choice of constructive-geometrical parameters of the cutting tool.

Keywords: composite material, fiberglass, mill, wear, finite element method, cutting force, stresses, cutting data.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА
ИЗ НАНОКОМПОЗИТА «алмаз – WC»**

*МЕЛЬНИЙЧУК Ю. А., канд. техн. наук,
КЛИМЕНКО С. А., доктор техн. наук, профессор,
КОПЕЙКИНА М. Ю., канд. техн. наук,
МАНОВИЦКИЙ А. С., канд. техн. наук
(Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина)*

Клименко С. А. – 04074, Украина, г. Киев, ул. Автозаводская, 2,
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины,
е – mail: atmu@meta.ua

Аннотация

Представлены результаты лабораторных и производственных исследований технологических возможностей режущих инструментов, оснащенных новым наноструктурным поликристаллическим сверхтвердым композитом «алмаз – WC». На примерах точения изделий из твердого сплава, углерадита, силицированного графита, алюминиево-кремниевого и алюминиевого сплавов показана перспективность применения алмазного инструмента для обеспечения эффективной обработки, характеризующейся высокими производительностью съема материала и стойкостью инструмента, обеспечением требуемой шероховатости обработанной поверхности.

Ключевые слова: наноккомпозит «алмаз – WC», твердый сплав, алюминийевые сплавы и неметаллические материалы, производительность обработки, стойкость инструмента.

Введение

Широкое применение в современном производстве изделий из твердых сплавов, цветных металлов и сплавов, древесно – стружечных, полимерных и других композиционных материалов требует совершенствования технологий их механической обработки, обеспечивающих как высокую производительность, так и требуемое качество обработанных поверхностей. Отмеченные материалы, зачастую, относятся к категории труднообрабатываемых, в связи с тем, что они содержат абразивные составляющие. В ряде случаев, к процессам механической обработки выдвигается требование, связанное с ограничением температуры в зоне резания. В таких условиях, наиболее перспективными материалами для режущих инструментов, применяемых при механической обработке таких материалов, являются поликристаллические сверхтвердые материалы на основе синтетического алмаза (ПКА) [1, 2].

Процесс резания лезвийным инструментом, оснащенным ПКА, характеризуется определенными особенностями, которые определяются физико-механическими свойствами и структурой композита: низким коэффициентом трения с обрабатываемыми материалами, высокими значениями тепло- и температуропроводности, которые обеспечивают сравнительно низкие температуры в зоне резания и позволяют проводить обработку на высоких скоростях резания; малыми значениями радиуса закругления режущих кромок; малыми силами резания по сравнению с силами при точении резцами с других инструментальных материалов; высокую износостойкость, которая обеспечивает соразмерную стойкость и длительную работу инструмента.

Одной из основных современных тенденций совершенствования рабочих материалов для режущих инструментов является создание наноструктурных композитов [3]. Это в полной мере относится и к поликристаллическим сверхтвердым материалам. В качестве связующего в них используют

ются тугоплавкие металлы, их оксиды, ряд других составляющих. Перспективным направлением показало себя использование в наноструктурных алмазных композитах вольфрама и его соединений.

Учитывая ряд преимуществ, которыми характеризуются инструменты с механическим креплением режущей части [4], в настоящей работе, на примере обработки ряда конструкционных материалов, рассмотрены технологические возможности режущих инструментов, оснащенных цельными пластинами из нового нанокompозита «алмаз – WC», в состав которого входит нанопорошок алмаза АСМ 0,5/0 и наночастицы карбида вольфрама.

Результаты и обсуждение

Из спеченных заготовок композита «алмаз – WC» изготовлены круглые режущие пластины RNMN 070300. Режущие пластины механически крепились в державке токарного резца с обеспечением задних углов 7° и 11° .

Для исследования возможности применения резцов из нанокompозита «алмаз – WC» были использованы втулки из твердого сплава BK15 диаметром 60 мм и длиной 80 мм.

Сравнение инструментов, оснащенных композитом «алмаз – WC» и алмазно-твердосплавными пластинами (АТП) (ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины) показало, что при скоростях резания до 20 м/мин не отмечается существенного различия в работоспособности таких резцов. При дальнейшем повышении скорости резания скорость изнашивания инструмента с нанокompозитом «алмаз – WC» значительно ниже по сравнению с инструментом с АТП (рис.1).

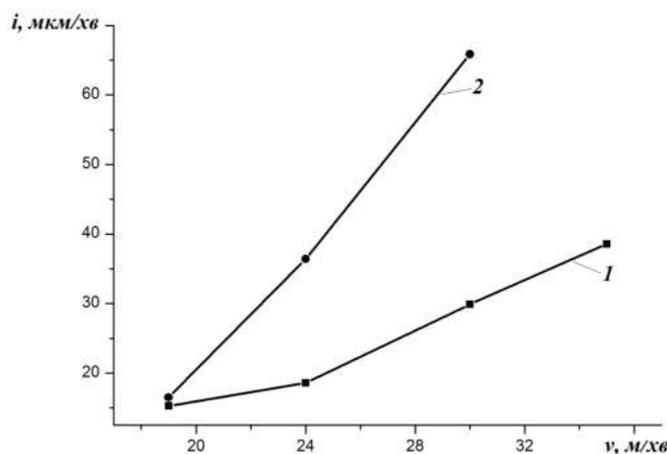


Рис. 1. Зависимость скорости изнашивания инструмента, оснащенного нанокompозитом «алмаз – WC» (1) и пластинами АТП (2), от скорости резания при точении твердого сплава BK15 ($S = 0,1$ мм/об; $t = 0,2$ мм; $\gamma = 0^\circ$; $\alpha = 10^\circ$)

Как видно рис. 2, износ инструмента с нанокompозитом «алмаз – WC» при точении твердого сплава BK15 имеет абразивный характер. В процессе точения преимущественно изнашивается задняя поверхность инструмента с образованием фаски износа без существенного разрушения режущей кромки.

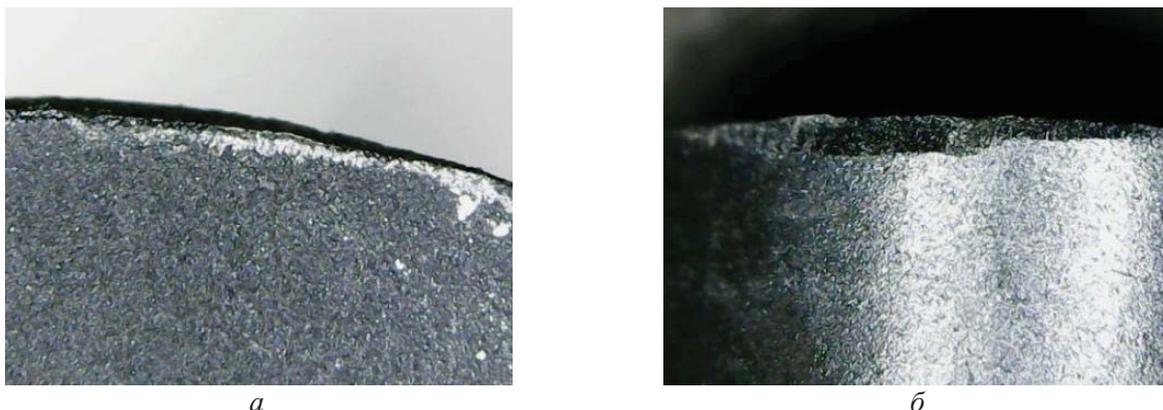


Рис. 2. Контактные участки передней (а) и задней (б) поверхностей инструмента с наноккомпозитом «алмаз – WC» после точения твердого сплава BK15 ($v = 36$ м/мин; $S = 0,14$ мм/об; $t = 0,2$ мм)

Исследования показали, что использование инструмента, оснащенного наноккомпозитом «алмаз – WC», эффективно при обработке изделий из углеродистого графита. Например, обработка втулок с углеродистыми АГ 1500 – C05 ТУ 20 – 3 – 72 выполняется при скоростях резания 300 – 350 м/мин. При этом достаточно трудно оценить стойкость инструмента в связи с низкой интенсивностью его изнашивания.

Применение инструмента с наноккомпозитом «алмаз – WC» является перспективным при обработке деталей, изготовленных из силицированного графита, например втулок подшипников в дизельных турбодвигателях (внешние диаметры 17,2 и 30 мм), изготовленных из материала СГП (SiC – 74,81 %, Si – 17,18 %, твердость 70 – 72 HRC).

После пяти проходов относительно торца втулки диаметром 17,2 мм ($v = 43$ м/мин; $S_{\text{п}} = 0,025$ мм/об; $t = 0,25$ мм) износ по задней поверхности режущего инструмента, оснащенных режущими пластинами из наноккомпозита «алмаз – WC» и АТП одного форморазмера, оказался примерно одинаковым $h_3 = 0,35$ мм. При обработке втулок большего диаметра повышение скорости резания от 33 до 60 м/мин при других постоянных параметрах ($S_{\text{п}} = 0,050$ мм/об; $t = 0,20$ мм, 4 прохода) не привело к существенному росту величины износа инструмента с наноккомпозита «алмаз – WC» ($h_3 = 0,40$ – $0,45$ мм).

Анализ результатов исследований показывает, что для повышения производительности обработку изделий из силицированного графита по корке рекомендуется проводить при режимах резания: $v = 50$ – 60 м/мин; $S = 0,14$ – 0,17 мм/об; $t = 0,10$ – 0,25 мм.

Наиболее широкой областью использования алмазного инструмента является обработка изделий из цветных металлов и сплавов.

При обработке алюминий-кремниевых (силуминовых) сплавов наблюдается медленное изнашивание инструмента с наноккомпозитом «алмаз – WC», интенсивность которого определяется содержанием кремния в обрабатываемом материале. Стойкость резцов составляет сотни часов.

При обработке поршней ДВС из сплава АЛ25 в широком диапазоне скоростей резания (160–700 м/мин) наблюдается образование нароста (особенно интенсивно в диапазоне низких скоростей резания) и налипание обрабатываемого материала на передней поверхности инструмента (рис. 3), что приводит к росту высотных параметров шероховатости обработанной поверхности.

Применение смазочно-охлаждающих технологических сред позволяет существенно улучшить качество обработанной поверхности. Так, при обработке поршней ДВС инструментом с наноккомпозитом «алмаз – WC» с использованием 3–5 % раствора концентрата полусинтетического водораствора

римого СОТС "Трибол" и вакуумного масла ВМ6 не наблюдается интенсивного наростообразования, а шероховатость обработанной поверхности Ra по сравнению с "сухим" точением снижается от 1,2 до 0,8 мкм.

Большое значение при обработке цветных сплавов имеет выбор геометрических параметров инструмента. Использование инструмента, оснащенного круглыми режущими пластинами из нанокompозита «алмаз – WC» $\varnothing 7,00$ мм с геометрическими параметрами $\alpha = 0^\circ$; $\gamma = 11^\circ$ ($v = 570$ м/мин; $S = 0,05$ мм/об; $t = 0,2$ мм; СОТС «Трибол»), позволяет стабильно получать обработанную поверхность с $Ra 0,45 - 0,52$. Увеличение отрицательного значения переднего угла инструмента приводит к росту шероховатости поверхности.

Использование круглой пластины $\varnothing 7$ мм за счет ее поворотов вокруг оси обеспечивает 6–8 периодов стойкости для инструмента, получение стабильной шероховатости обработанной поверхности. При обработке участков поршня с канавками под компрессионные кольца и отверстием под шатунный палец ($v = 570$ м/мин; $S = 0,05$ мм/об; $t = 0,2 - 0,3$ мм) инструмент работает с ударными нагрузками (рис. 4), однако, на режущем инструменте с нанокompозитом «алмаз – WC» не наблюдается скалывание режущей кромки, вызванное действием ударных нагрузок, что свидетельствует о высокой ударопрочности такого композита в инструменте при обработке изделия из силуминового сплава.

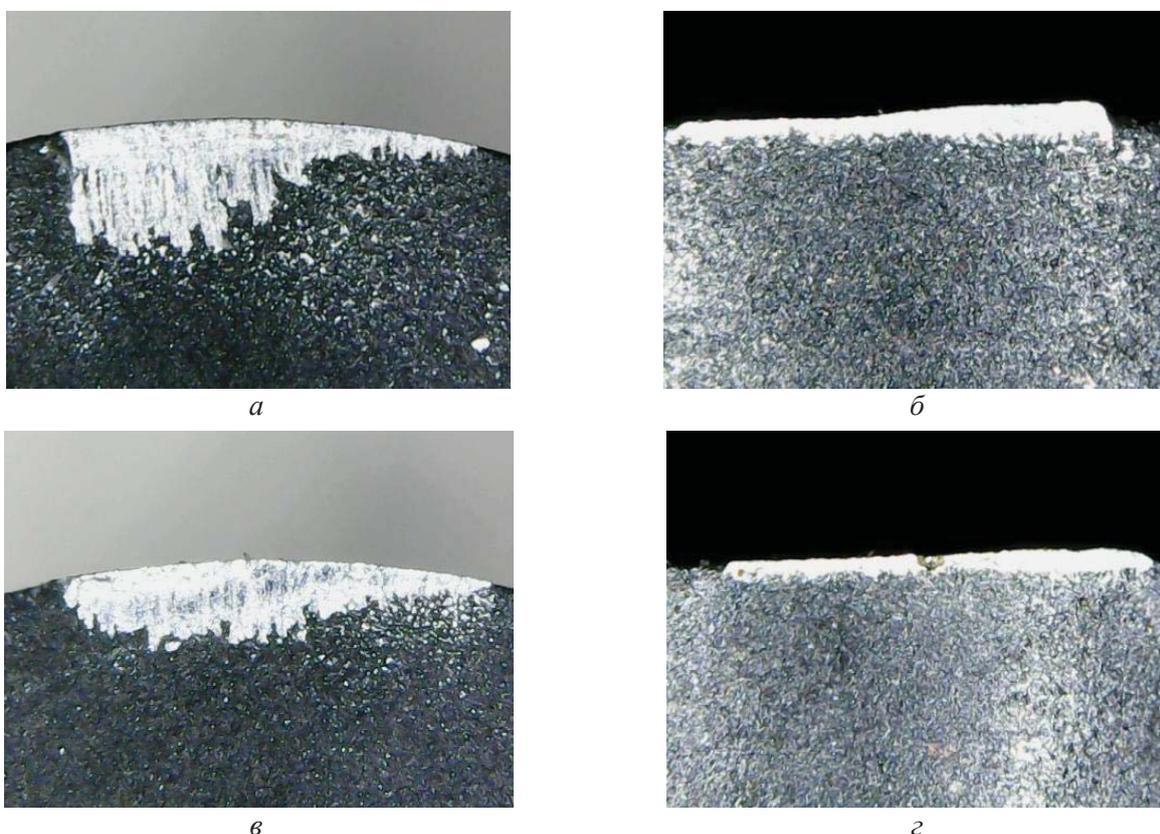
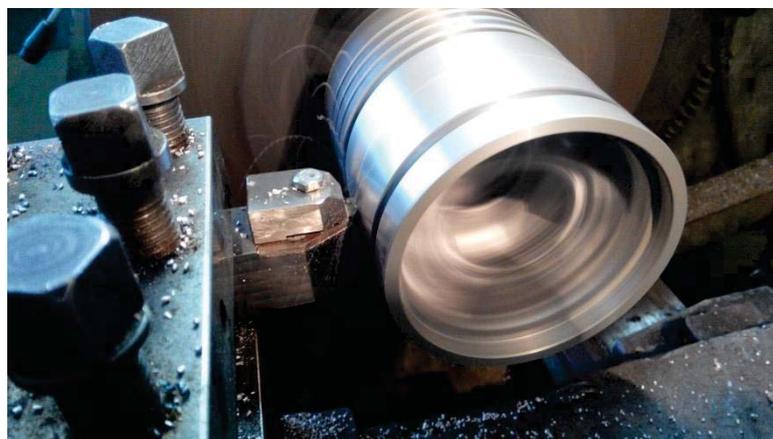


Рис. 3. Контактные участки передней (*а, в*) и задней (*б, г*) поверхностей инструмента с нанокompозитом «алмаз – WC» после точения сплава АЛ25: *а, б* – $v = 160$ м/мин; $S = 0,1$ мм/об; $t = 0,2$ мм; *в, г* – $v = 570$ м/мин; $S = 0,1$ мм/об; $t = 0,2$ мм



a



б

Рис. 4. Общий вид поршня ДВС и процесс его точения инструментом с нанокompозитом «алмаз – WC» ($v = 570$ м/мин; $S = 0,05$ мм/об; $t = 0,2$ мм)

Существенно на шероховатость поверхности влияет продольная подача, с ростом которой наблюдается ухудшение качества поверхности. Поэтому, для достижения высокого качества поверхности чистовую обработку деталей из силуминовых сплавов рекомендуется проводить с подачами 0,02 – 0,05 мм/об. Увеличение глубины резания в диапазоне 0,05 – 0,50 мм не приводит к существенному росту параметра Ra . Скорость резания в широком диапазоне значений (160 – 570 м/мин) существенно не влияет на шероховатость обработанной поверхности при обработке силуминовых сплавов

Выводы

Полученные результаты лабораторных и производственных исследований показали, что режущий инструмент, оснащенный нанокompозитом «алмаз – WC», позволяет эффективно обрабатывать изделия из твердых сплавов, цветных металлов и сплавов, неметаллических материалов.

Нужно подчеркнуть, что обрабатываемые материалы, рассмотренные в настоящей работе, характеризуются повышенной абразивной способностью, что вызывает существенные сложности в процессе механической обработки, изготавливаемых из них изделий. В этом случае алмазный инструмент является наиболее работоспособным – обеспечивает высокие производительность съема материала и стойкость режущего инструмента, а также позволяет получить требуемое качество обработанной поверхности изделий.

Список литературы

1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6-и т. / Под общ. ред. Н.В. Новикова. – Т.5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С.А. Клименко. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 316 с.
2. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. – М: Машиностроение, 2014. – 608 с.

3. Новиков Н.В., Клименко С.А., Бочечка А.А. Наноматериалы в технологиях механической обработки // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Житомир: ЖДТУ, 2012 – Вип. 13. – С. 153 – 172.

4. Твердосплавные инструменты в процессах механической обработки / Под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, 2015. – 368 с.

TECHNOLOGICAL OPPORTUNITIES OF CUTTING TOOL FROM NANOCOMPOSIT "diamond – WC"

Melniychuk Yu.A., candidate of technical Sciences

Klimenko S.A., Doctor of technical sciences, professor e – mail: atmu@meta.ua

Kopeykina M.Yu., candidate of technical Sciences

Manovitsky A.S., candidate of technical Sciences

V.N. Bakulev Institute of superhard materials National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, Kiev, st. Avtozavodskaya, 2, 04074

Annotation

The results of laboratory and production studies of the technological capabilities of cutting tools equipped with a new nanostructured polycrystalline superhard composite «diamond – WC» are presented. Examples of the turning of articles with abrasive components of the hard alloy, carbon graphite, silicified graphite, aluminum-silicon and aluminum alloys show the promise of using a tool from a new nanostructured diamond composite to provide efficient cutting with high material removal and tool life, the required roughness of the treated surface.

Keywords: «diamond – WC» nanocomposite, hard alloy, aluminum alloys and non-metallic materials, processing capacity, tool life.

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ УПРОЧНЕННЫХ ППД ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА БАЗЕ МЕХАНИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ

*БЛЮМЕНШТЕЙН В. Ю., доктор техн. наук, профессор
(КузГТУ имени Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия)*

Блюменштейн В.Ю. – 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28,
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
е – mail: Blumenstein@rambler.ru

Аннотация

В работе представлена разработанная автором механика технологического наследования. Разработана модель накопления деформации и исчерпания запаса пластичности металла на стадии циклической долговечности, в основу которой положены единые по физическому смыслу представления о показателе схемы напряженного состояния. Показано, что в зависимости от уровня упрочнения и тензора наследственных остаточных напряжений характер и численные значения деформационных параметров изменяются в широких пределах. Выполнены экспериментальные исследования и расчеты и показано, что разработанная методика с учетом истории нагружения имеет высокую достоверность.

Ключевые слова: упрочнение, поверхностное пластическое деформирование, циклическая долговечность, механика технологического наследования, степень деформации сдвига, степень исчерпания запаса пластичности.

Введение

Многочисленными исследованиями и практикой показано, что качество поверхностного слоя играет важную роль в обеспечении долговечности деталей машин. Известно, что в большинстве случаев причиной выхода из строя деталей машин являются усталостные разрушения. В условиях переменных нагрузок и напряжений работает значительное количество деталей судовых, тракторных и автомобильных двигателей, торсионные валы, оси железнодорожных вагонов и электровозов, пальцы кривошипов, валы редукторов сельскохозяйственных, дорожных и горных машин и др., поэтому обеспечение заданного ресурса работы этих деталей по-прежнему является весьма актуальной задачей.

Исследования В.С. Ивановой, В.П. Когаева, Б.А. Краченко, И.В. Кудрявцева, А.А. Маталина, Н.А. Махутова, И.А. Одинг, П.А. Павлова, С.В. Серенсена, Л.А. Сосновского, В.Т. Трощенко и других ученых показали, что усталостное разрушение наблюдается главным образом в поверхностных слоях деталей машин [1 – 10].

Действительно, в процессе эксплуатации деталей машин поверхностные слои испытывают наибольшие напряжения независимо от характера рабочих нагрузок. К тому же, поверхность деталей может быть ослаблена рисками, разрывами, структурными концентраторами напряжений, трещинами, неоднородной шероховатостью поверхности, появляющейся при изготовлении и эксплуатации деталей машин.

Работы И.В. Кудрявцева, М.А. Балтер, Д.Д. Папшева, Л.А. Хворостухина, Ю.Г. Шнейдера и других показывают, что в результате обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) сопротивление усталости гладких образцов из углеродистых сталей повышается от 15 до 48 %, легированных сталей – от 15 до 81 % [3 – 4, 11, 13 – 15]. В ряде работ отмечен рост предела выносливости после обработки ППД для алюминиевых сплавов от 23 до 33 %, для магниевых сплавов от 12

до 24 %, титановых сплавов от 10 до 14 %. Особенно высоким является эффект упрочнения образцов с концентраторами напряжений, составляющий 2,5 – 3,0 и более раз.

К настоящему времени усталостные свойства и закономерности поведения различных материалов в процессах мало- и многоциклового, мягкого и жесткого усталостного нагружения с различной формой циклов описаны в категориях механических свойств материалов, конструктивных и технологических параметров деталей машин после обработки различными методами, в том числе, ППД [11, 16]. Получены результаты, показывающие влияние всего спектра параметров качества поверхностного слоя на характеристики усталостной долговечности, а именно, шероховатости, микроструктуры, упрочнения и остаточных напряжений [17]. Установлено, что обработка ППД не только замедляет рост усталостных трещин, но при определенных условиях приводит к полной остановке их распространения [18].

Точка зрения исследователей, занимающихся вопросами прочности конструкционных материалов, основана на современных физических представлениях о реальном твердом теле, которое состоит из первичных элементов структуры материала (зерна и поверхности раздела между ними) и дефектов различного рода. В области многоциклового усталости отмечено явление неупругости металлов, которая характеризует его способность образовывать в пределах одного цикла изменения нагрузки замкнутую петлю механического гистерезиса. Величина неупругой деформации характеризует величину микропластической деформации, которая возникает в процессе усталостного нагружения [16].

Многие исследователи признают, что в процессе усталостного нагружения напряженное состояние не является однородным; компоненты действующих напряжений изменяются в связи с релаксацией остаточных напряжений и постепенным накоплением поврежденности, что приводит к изменению интенсивности этого процесса [16, 19].

Показано, что предыстория усталостного нагружения влияет на пластичность и долговечность материала при последующем нагружении по различным траекториям [20].

А.С. Гусев отмечает, что если параметры нелинейности усталостного нагружения различны, то различные истории нагружения приведут к различным результатам [21].

А.Н. Романов разработал критерий циклического разрушения, основанный на представлении о повреждающей роли микронапряжений на пути упругой и пластической деформации [22]. Этот критерий оценивает степень поврежденности деталей с учетом истории нагружения; в частности, на стадии накопления поврежденности при мягком нагружении критерий рассчитывается по формуле:

$$\eta = \int_0^N \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^N \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} dN + \int_0^N \frac{\delta\varepsilon_y}{\varepsilon^2} dN, \quad (1)$$

где δ – ширина петли гистерезиса в полупериоде растяжения; $\Delta\varepsilon$ – односторонне накопленная пластическая деформация в полупериоде растяжения; ε – предельная деформация при статическом разрыве образца; N – текущее число циклов; ε_y – упругая деформация в полупериоде растяжения. Первый член уравнения (1) определяет усталостное повреждение от действия циклически обратимой пластической деформации, второй член – повреждение от односторонней пластической деформации, и третий член – повреждение от действия упругой деформации. Д. В. Алексеев и Г. А. Казунина выполнили моделирование и численные расчеты накопления повреждений в нагруженных материалах вероятностным клеточным автоматом [23].

Achourgi, M.a b, Жермен, G.a, Dal Santo и P.a, Saidane, D.b выполнили экспериментальный и численный анализ микромеханического повреждения при нагружении листовых низколегированных сталей высокой прочности [24]. Показано, что процесс нагружения в начале производственной це-

почки, оказывает важное влияние на напряжение, напряжение и состояния повреждения в нагруженных зонах.

Liu, R.a, Salahshoor, M.a , Melkote, S.N.a , Marusich, T.b b разработали объединенную модель материала с переменным внутренним состоянием для неупругой деформации и эволюции микроструктуры сплава SS304 [25]. Авторы показали, что на фундаментальном уровне термомеханическое состояние металлов при неупругом нагружении определяется механикой дислокаций и связанной с этим эволюцией микроструктуры. Модель учитывает процессы эволюции размеров зерна и хорошо соответствует экспериментальным данным при деформации сплава SS304.

Guan, D.a, Sun, Q.a и Yang, F.b использовали механику разрушения и энергетическое условие для разработки модели усталостного повреждения; модель учитывает пластическое упрочнения и заживления дефектов в процессе эволюции усталости [26]. Моделирование проводилось МКЭ-методом в программном продукте ABAQUS/Explicit через пользовательскую подпрограмму материала UMAT. Достоверность результатов получена путем сравнения с экспериментальными данными алюминиевого сплава 7050 – T7451.

K.I. Kourogousis разработал циклическую модель пластичности для современных легких металлических сплавов [27]. В модели использованы представления о неупругом деформировании с различной историей нагружения и релаксации напряжений применительно к сплавам алюминия и титана.

В работах А.А. Шанявского [28 – 29] рассмотрены нелинейные модели усталостного разрушения металлов при различных видах нагружения. Автор представил единую методологию представления физики металлов, мезомеханики разрушения, фрактографии и синергетики, позволившую рассматривать единую бифуркационную усталостную кривую и кинетическую кривую роста трещин для авиационных сплавов на основе Al, Ti, Fe, Ni и Mg. Изучены и представлены механизмы зарождения и распространения трещин под поверхностью или с поверхности после ее упрочнения.

Mikheevskiy, S.a , Glinka, G.a , Lee, E.b рост усталостной трещины рассмотрели как процесс последовательных приращений дефектов с учетом истории напряжения; поэтому инициирование усталостной трещины и ее последующий рост смоделированы как один повторяющийся процесс. Эксперименты, проведенные на алюминиевых сплавах, показали высокое качество разработанной модели [30].

Представляет интерес исследование, в котором оценивается совместное влияние упрочнения и остаточных напряжений на формирование рабочих напряжений и предел выносливости [31]. Деформирование поверхностного слоя при обкатывании шариками создает в нем такие зоны (очаги), которые при приложении к детали внешних циклических нагрузок начинают деформироваться в первую очередь, а процесс накопления повреждений в них осуществляется быстрее (точка А на рис. 1). Поскольку зона вокруг точки А характеризуется некоторым уровнем поврежденности, достигнутой в процессе обкатывания, то накопление усталостных повреждений начинается уже с этого уровня. При достижении определенного критического значения поврежденности происходит зарождение усталостной трещины.

В.Т. Трощенко и Н.И. Жабко предложили аналитическое решение по оценке деформаций в процессе циклического нагружения в условиях неоднородного напряженного состояния [32]. Особенностью полученных результатов является учет остаточных напряжений, отмечающихся при циклическом упруго – пластическом деформировании.

При выводе основных расчетных соотношений, связывающих изгибающий момент и характеристики диаграмм деформирования, авторы исходили из следующих предположений: зависимость напряжений от деформаций определяется исходя из модуля продольной упругости материала и модуля упрочнения при циклическом нагружении за пределом упругости; материал является циклически стабильным, т.е. в процессе циклического деформирования его свойства не изменяются; справедлива гипотеза плоских сечений и отсутствует давление

волокон друг на друга в поперечном направлении; рассматривается случай циклического знакопеременного изгиба прямоугольного образца, когда в его сечении имеют место стабилизовавшиеся неупругие деформации. На рис. 2: прямая 1 соответствует повороту сечения образца при действии изгибающего момента $M_{И} = M_{max}$; прямая 2 – положению этого сечения при $M_{И} = 0$ после предварительного нагружения в упруго-пластическую область моментом M_{max} противоположного знака; прямая 3 – пластическим деформациям. Границей зон упругого и неупругого деформирования является линия А – А.

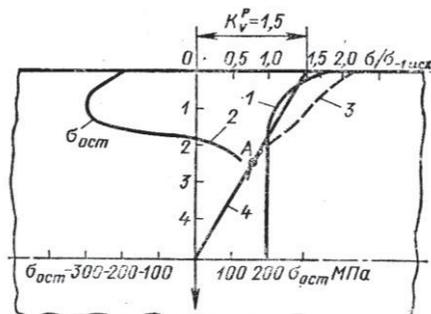


Рис. 1. Схема для пояснения эффекта упрочнения при обкатывании шариками стальных образцов при глубине упрочненного слоя 2 мм: 1 – эпюра распределения твердости; 2 – эпюра остаточных напряжений; 4 – эпюра эксплуатационной нагрузки; 3 – преобразованная эпюра нагрузки следствие воздействия нагрузки и остаточных напряжений

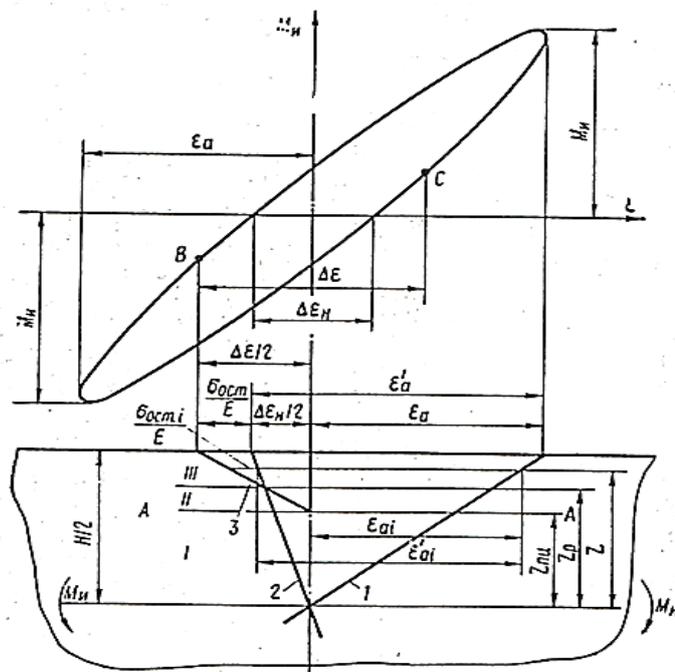


Рис. 2. Схема распределения деформаций в сечении образца при его упруго – пластическом изгибе и связь их с параметрами динамической петли гистерезиса: ϵ_a – амплитуда деформации на поверхности исследуемого образца; ϵ_{ai} – деформация поверхностного волокна за полцикл при изменении изгибающего момента от 0 до M_{max} ; ϵ_{ai} – то же для произвольного волокна по высоте образца; σ_a – амплитуда напряжений; $\sigma_{ост}$ – остаточные напряжения на поверхности при $M_{И} = 0$; $\sigma_{остi}$ – остаточные напряжения в произвольном волокне по высоте образца; $\Delta\epsilon$ – неупругая деформация поверхностного волокна за цикл; $\Delta\epsilon_n$ – ширина динамической петли гистерезиса поверхностного волокна в координатах $M_{И} - \epsilon_a$; $z_{пц}$ – расстояние от нейтрального волокна до зоны неупругого деформирования; z_p – расстояние от нейтрального волокна до уровня, где остаточные напряжения равны нулю

Авторы показали, что значения $M_{и}$, рассчитанные с учетом остаточных напряжений, всегда меньше, чем без их учета. Учет остаточных напряжений приводит к снижению расчетных значений напряжений / изгибающих моментов, полученных при использовании экспериментально найденной диаграммы деформирования при циклическом растяжении-сжатии. Установлено также, что между действительными и номинальными значениями неупругих деформаций за цикл имеет место существенная разница, которую необходимо учитывать при формулировании критериев усталостного разрушения металлов.

В ряде научных исследований получены результаты, показывающие роль технологической наследственности, как правило, с точки зрения влияния финишной операции на усталостную долговечность деталей [33 – 34].

Общепринятые методики расчета на усталость предполагают знание напряжений цикла, коэффициентов запаса прочности, механических свойств материала, единичных параметров качества поверхностного слоя и др. Однако, после ряда операций механической обработки, включающей и обработку ППД, реальный металл упрочнен, причем имеет место сложное распределение свойств по глубине поверхностного слоя с учетом технологического наследования. Кроме того, при идентичных параметрах качества поверхностного слоя история его нагружения может существенно различаться для различных деталей машин, что приводит и к различным параметрам усталостной долговечности. Важно также, что в процессе усталостного нагружения происходят релаксационные процессы, изменяющие как свойства материала, так и схему нагружения.

Таким образом, существует ряд точек зрения на процессы усталостного нагружения и влияния на эти процессы технологии механической обработки. Закономерно считается, что ППД увеличивает сопротивление усталости; при этом чаще всего проводится оценка раздельного влияния остаточных напряжений и упрочнения на усталостную долговечность.

В то же время сложились устойчивые представления о феноменологии усталостного нагружения, в соответствии с которыми в поверхностном слое деталей машин накапливаются усталостные повреждения, оценить которые можно с помощью различных подходов и критериев. При этом если поверхностный слой был предварительно обработан (упрочнен), то накопление дефектов продолжается с ранее накопленного уровня. Однако не существует единого подхода к оценке непрерывного накопления дефектов, как в процессах механической обработки, так и в процессах усталостного нагружения. Это не позволяет проводить оценку вклада каждой операции механической обработки в повышение сопротивления усталости, что затрудняет проектирование технологий упрочняющей механической обработки с учетом технологического наследования.

Сложность раскрытия закономерностей технологического наследования заключается в том, что различные стадии нагружения поверхностного слоя (например, резание, поверхностное пластическое деформирование, эксплуатационное усталостное нагружение) рассматриваются с привлечением различных понятийных аппаратов и методологий.

Несмотря на сложность протекающих в поверхностном слое явлений современная наука позволяет описать их с использованием основных положений механики деформируемых сред.

Автором разработана механика технологического наследования (ТН), в основе которой лежат физические представления о непрерывном накоплении деформации и исчерпании запаса пластичности металлом поверхностного слоя на последовательных стадиях жизненного цикла изделия [34 – 36]. Механическая обработка резанием и поверхностным пластическим деформированием приводит к пластическому течению и постепенному исчерпанию запаса пластичности металла в очаге деформации в условиях сложного напряженно-деформированного состояния; в результате происходит формирование поверхностного слоя с определенной микрогеометрией, микроструктурой, упрочнением и остаточными напряжениями. При этом накопление усталостных повреждений с позиций механики ТН имеет ту же физическую природу поведения металла. Иными словами, последующее усталостное нагружение приводит к продолжающемуся накоплению деформации и исчерпания запаса пластичности.

Накопление предельных для данной схемы нагружения деформаций означает полное исчерпание запаса пластичности и появлению несплошности в поверхностном слое детали.

Теоретические исследования

Рассматривался жизненный цикл детали, включающий стадии резания, поверхностного пластического деформирования и последующего усталостного нагружения. Начальные и граничные условия для решения задач механики ТН на стадиях резания и ППД формировались путем проведения экспериментальных исследований в наследственной постановке. Решались задачи механики деформирования, выполнялся анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) металла вдоль линий тока в очагах деформации. Оценка накопленной степени деформации сдвига Λ и степени исчерпания запаса пластичности Ψ проводились по методике, описанной в [38].

Усталостное нагружение было представлено двумя стадиями: стадией циклической долговечности (ЦД) и стадией циклической трещиностойкости (ЦТ).

Для описания продолжающегося накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности на стадии циклической долговечности от уровня, достигнутого после механической обработки, использовался принятый аппарат механики деформирования [37, 39]. С целью выполнения расчетов предложен единый по структуре и физическому смыслу показатель схемы напряженного состояния для различных стадий и этапов нагружения – механической обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием и усталостного нагружения.

На стадии циклической долговечности в условиях симметричного изгиба с вращением образец находится под действием поперечной силы. При этом напряжения кручения не возникают, так как сила лежит в плоскости симметрии образца. В самом общем случае, в опасном сечении действуют касательные «срезающие» напряжения и нормальные (осевые) напряжения. Известно, что при достаточно большом соотношении длины к диаметру образца касательные напряжения уменьшаются и составляют сравнительно небольшую величину от нормальных. При изгибе тонкого стержня большей является только растягивающая (или сжимающая) компонента тензора внутренних напряжений. Деформация, в которой отлична от нуля только компонента тензора напряжений σ_x , действующих вдоль главной оси, есть не что иное, как деформация простого растяжения или сжатия.

Усталостные (циклические) напряжения в тензорном виде были представлены как

$$[T\sigma_{уст}] = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Расчет тензора остаточных напряжений выполняли в соответствии с теоремой о разгрузке, согласно которой

$$[T\sigma_{ост}] = [T\sigma_{деф}] - [T\sigma_{раз}] + [T\sigma_{раскр}] + [T\sigma_{t^0}], \quad (3)$$

где $[T\sigma_{деф}]$ – тензор напряжений, возникающих в реальном упругопластическом теле при приложении нагрузки; $[T\sigma_{раз}]$ – тензор напряжений, которые возникали бы в идеально упругом теле при идентичном нагружении; $[T\sigma_{раскр}]$ – тензор напряжений упругой разгрузки при раскреплении детали; $[T\sigma_{t^0}]$ – тензор упругих тепловых напряжений разгрузки.

Тензор наследственных остаточных напряжений для условий задачи плоского деформированного состояния был представлен как

$$[T\sigma_{ост}] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}$ – соответственно нормальные и касательная компоненты остаточных напряжений.

Результирующее напряженное состояние определяли суперпозицией остаточных напряжений и напряжений от нагружения внешними силами. При совпадении направлений векторов главных напряжений для обеих составляющих и при симметричном цикле напряжений от внешней нагрузки поверхностный слой изделия работает в условиях асимметрии цикла тем большей, чем больше остаточные напряжения. Среднее напряжение цикла при этом равно остаточному напряжению, а амплитуда равна напряжению от внешней нагрузки. В условиях циклического нагружения сжимающие остаточные напряжения повышают, а растягивающие – снижают усталостную прочность. При этом остаточные напряжения независимо от их знака релаксируют в каждом цикле нагружения. Чем ближе значение результирующих напряжений к пределу текучести, тем с большей скоростью происходит полная релаксация остаточных напряжений.

Исходя из вышесказанного, тензор действующих (суммарных) напряжений может быть представлен в виде суммы тензоров остаточных и усталостных напряжений:

$$[T\sigma_d] = [T\sigma_{ост}] + [T\sigma_{уст}]. \quad (5)$$

Из тензора действующих напряжений выделяли первый, второй и третий инварианты с последующим определением главных напряжений, интенсивности касательных напряжений и показателя схемы напряженного состояния. В рамках данной работы, показатель схемы напряженного состояния Π определялся отношением среднего нормального напряжения σ к интенсивности касательных напряжений T в виде $\Pi = \sigma/T$.

При выполнении последующих расчетов приняли, что релаксация остаточных напряжений и, соответственно, изменение показателя схемы происходит в течение всего времени усталостного нагружения. В рамках рассматриваемого подхода релаксация каждой компоненты остаточных напряжений под воздействием циклических нагрузок описывалась уравнением, полученным путем статистической обработки результатом экспериментальных исследований:

$$\sigma_{ост} = \sigma_{ост0} + \frac{a}{\ln(bN^c)}, \quad (6)$$

где $\sigma_{ост0}$ – начальное (стартовое) численное значение компоненты остаточных напряжений в выбранной точке; N – текущее значение числа циклов; a, b, c – коэффициенты.

Разработана модель накопления деформации и исчерпания запаса пластичности металла на стадии циклической долговечности.

Согласно этой модели по окончании механической обработки в поверхностном слое имеет место остаточное (наследуемое) НДС, характеризуемое распределением степени деформации сдвига $\Lambda_{мех}$ и степени исчерпания запаса пластичности $\Psi_{мех}$ по глубине $h_{мех}$, а также тензора остаточных напряжений $[T\sigma_{ост}]$, уравновешенных в пределах детали (рис. 3). Программа нагружения была представлена в известных координатах « $\Pi - \Lambda$ » (рис. 4).

Старт стадии циклической долговечности означает циклическое изменение показателя схемы напряженного состояния в каждой точке поперечного сечения детали. Вследствие неравномерного характера распределения компонент тензора остаточных напряжений эпюры показателя схемы будет изменяться от некоторого максимального Π^+ до некоторого минимального Π^- значений в каждом

рассматриваемом сечении детали (см. рис. 3). Как показывают результаты многочисленных исследований, существует некая материальная точка (частица), расположенная в определенном сечении детали и на определенной глубине от поверхности $h_{тр}$, где наиболее вероятно появление следов разрушения (видимой трещины). По всей видимости, таким сечением будет то, в котором имеет место наиболее «жесткая» схема нагружения. Поэтому достаточным будет проведение оценки накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности в этом сечении и именно в этой материальной точке, названной точкой вероятного разрушения.

В нулевой момент времени усталостные напряжения отсутствуют. Тогда на старте стадии циклической долговечности действуют только остаточные напряжения, и показатель схемы напряженного состояния определяется через компоненты этих (действующих) напряжений:

$$\Pi_d = \frac{\frac{1}{3} I_1 [T\sigma_{ост}]}{\sqrt{|I_2 [D\sigma_{ост}]|}} \quad (7)$$

где $I_1 [T\sigma_{ост}]$ – первый инвариант тензора остаточных напряжений; $I_2 [D\sigma_{ост}]$ – второй инвариант диватора остаточных напряжений.

В рамках предлагаемой модели накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности металла поверхностного слоя происходит при меняющемся от цикла к циклу, а также в пределах каждого цикла, показателе схемы напряженного состояния. Это обусловлено, прежде всего, релаксацией остаточных напряжений и их полным исчезновением в момент образования видимой усталостной трещины; в этот момент времени в опасном сечении действуют только усталостные напряжения.

Завершается рассматриваемая стадия полной релаксацией остаточных напряжений и полным исчерпанием запаса пластичности. В этот момент времени в точке с координатой $h_{тр}$ степень исчерпания запаса пластичности $\Psi_{цд} = 1$; произошло увеличение степени исчерпания запаса пластичности в направлении к поверхности детали, что описывается эпюрой $\Psi_{цд}'$; произошло увеличение степени исчерпания запаса пластичности в направлении к оси детали до глубины $h_{цд}$, что описывается эпюрой $\Psi_{цд}''$ (рис. 3).

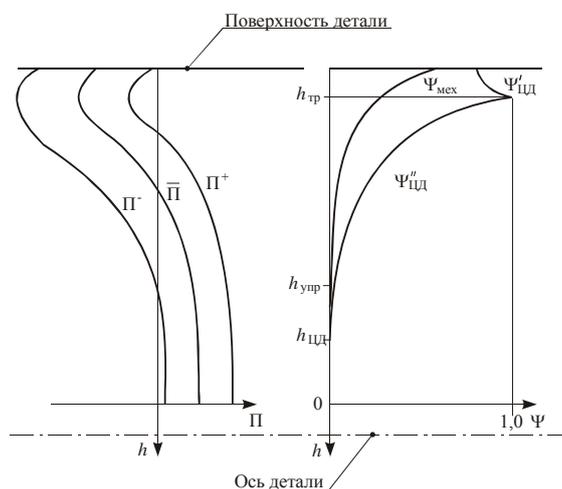


Рис. 3. Распределение параметров напряженно – деформированного состояния по глубине упрочненного поверхностного слоя детали в процессе циклического нагружения

В этот момент времени действуют только усталостные напряжения, а величина показателя схемы действующего напряженного состояния определяется выражениями:

$$\Pi_d = \frac{\frac{1}{3} I_1 [\Gamma \sigma_{уст.}]}{\sqrt{|I_2 [D \sigma_{уст.}]|}} = \pm 0,577, \quad (8)$$

где $I_1 [\Gamma \sigma_{уст.}]$ – первый инвариант тензора усталостных напряжений; $I_2 [D \sigma_{уст.}]$ – второй инвариант девиатора усталостных напряжений. На рис. 4 это состояние обозначено как «финиш» стадии циклической долговечности при минимальном и максимальном значениях амплитуды напряжений от внешней нагрузки.

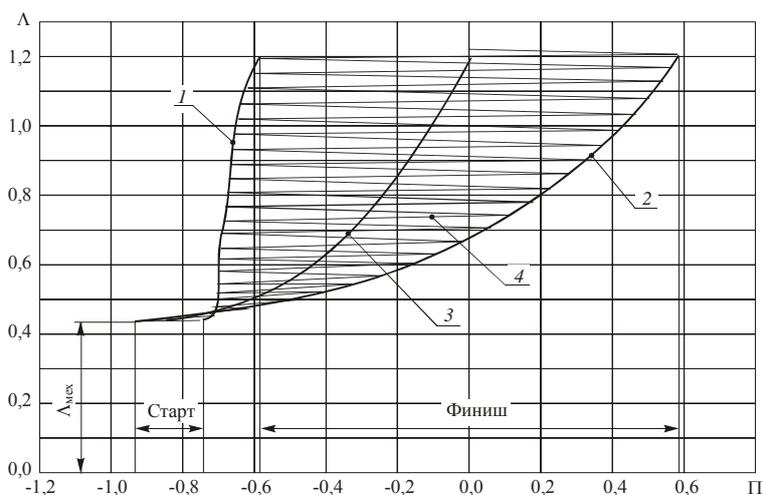


Рис. 4. Программа нагружения на стадии циклической долговечности с учетом наследственной деформации в зависимости от изменения знака цикла:

1, 2 – огибающие линии программы нагружения при отрицательном и положительном значении напряжения цикла; 3 – огибающая линия программы нагружения при среднем в цикле показателе схемы; 4 – ступенчатая линия программы нагружения при изменении напряжений цикла от положительных до отрицательных значений

Полученные значения показателя схемы напряженного состояния от действующих усталостных напряжений на финише стадии циклической долговечности соответствует условиям одноосного растяжения и сжатия.

Поверхностный слой металла детали по своим свойствам в этот момент времени является еще более неравномерным; границей этой неравномерности является несплошность в виде несплошности (начальной усталостной трещины) размером 0,02...0,2 мм. Появление этих видимых дефектов означает начало новой стадии – стадии циклической трещиностойкости.

Результаты и обсуждение

Усталостным испытаниям подлежали 8 серий по 8 образцов в каждой серии. Испытания проводились при частоте оборотов $n = 50 \text{ с}^{-1}$, время одного оборота (цикла) равно $t = 1/50 = 0,02 \text{ с}$; амплитуда напряжений цикла составляла $-280 \text{ МПа} \leq \sigma_a \leq +280 \text{ МПа}$. Образцы изготавливали на

станке с ЧПУ, после проводили отжиг с целью снятия упрочненного предварительной обработкой слоя. Далее проводилась токарная обработка на станке с ЧПУ со следующим режимом: $n = 2000$ об/мин; $S = 0,25$ об/мин; $a = 1$ мм.

Геометрия режущей части инструмента из твердого сплава ВК3 составляла: $\alpha = 9^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\lambda = 0$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 30^\circ$; $\rho = 0,03$ мм. Обкатывание усталостных образцов с диаметром рабочей части 20 мм на станке с ЧПУ проводилось по режимам, представленным в табл. 1.

В каждой серии образцов обрабатывался один образец-свидетель, на котором проводилась фиксация очага деформации.

По параметрам очагов деформации после обработки резанием и ППД выполнялись МКЭ – моделирование НДС, расчет механического состояния металла поверхностного слоя вдоль линий тока. При этом расчетные параметры механики после обработки резанием служили начальными условиями для решения наследственной задачи механики ППД и усталостного нагружения. Расчетно-экспериментальным путем определили точку вероятного разрушения; в этой точке имеет место наиболее «жесткая схема» напряженно-деформированного состояния (максимальный уровень растягивающих напряжений при максимальном уровне степени деформации сдвига и степени истощения запаса пластичности) (табл. 2).

Таблица 1

Режимы обкатывания усталостных образцов

| Номер серии | Усилие P , Н | S , мм/об | n , об/мин | Профильный радиус ролика $R_{пр}$, мм |
|-------------|-----------------------------------|-------------|--------------|--|
| 0 | После отжига и токарной обработки | | | |
| 1 | 1000 | 0,07 | 630 | 5 |
| 2 | 1500 | | | |
| 3 | 2000 | | | |
| 3 | 2000 | | | |
| 4 | 3000 | | | |
| 5 | 3500 | | | |
| 6 | 4000 | | | |
| 7 | 4500 | | | |

Таблица 2

Результаты расчетов степени деформации сдвига и степени истощения запаса пластичности в точках вероятного разрушения перед стартом стадии ЦД

| Номер серии | $\Lambda_{мех}$ | Глубина упрочнения, $h_{мех}$, мм | Ордината точки вероятного разрушения, $h_{тр}$, мм | $\Lambda_{мехh_{тр}}$ | $\Psi_{мехh_{тр}}$ |
|-------------|-----------------|------------------------------------|---|-----------------------|--------------------|
| 1 | 0,46 | 1,68 | 0,27 | 0,42 | 0,48 |
| 2 | 0,67 | 1,68 | 0,37 | 0,55 | 0,58 |
| 3 | 0,67 | 1,95 | 0,47 | 0,53 | 0,57 |
| 4 | 0,76 | 1,93 | 0,46 | 0,59 | 0,62 |
| 5 | 1,06 | 2,03 | 0,51 | 0,79 | 0,78 |
| 6 | 1,20 | 2,10 | 0,55 | 0,89 | 0,86 |
| 7 | 1,24 | 2,06 | 0,53 | 0,90 | 0,87 |

В табл. 3 приведены значения числа циклов до появления видимой трещины (циклическая долговечность) $N_{ЦД}$, предельное число циклов N_P и число циклов, соответствующих продолжительности стадии циклической трещиностойкости $N_{ЦТ} = N_P - N_{ЦД}$

Таблица 3

Результаты усталостных испытаний (средние значения по каждой серии опытов)

| № серии | $N_{ЦД}$ | N_P | $N_{ЦТ}$ |
|---------|----------|---------|----------|
| 1 | 2050000 | 2420000 | 370000 |
| 2 | 2683333 | 3483333 | 800000 |
| 3 | 5133333 | 6000000 | 866667 |
| 4 | 5550000 | 7100000 | 1550000 |
| 5 | 5400000 | 6800000 | 1400000 |
| 6 | 5250000 | 6450000 | 1200000 |
| 7 | 4100000 | 6100000 | 2000000 |

В качестве примера рассмотрим закономерности механики усталостного нагружения в точке вероятного разрушения для первой серии испытаний (рис. 5 – 7).

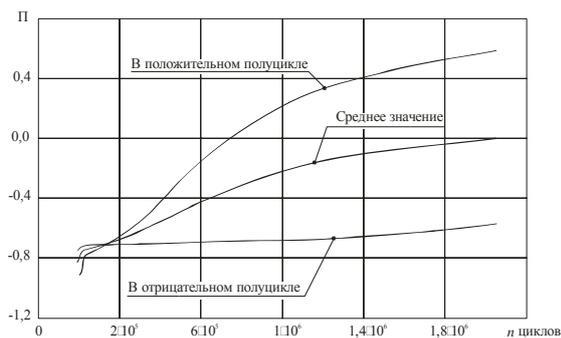


Рис. 5. Зависимости показателя схемы напряженного состояния от числа циклов в опасной точке для 1 – й серии

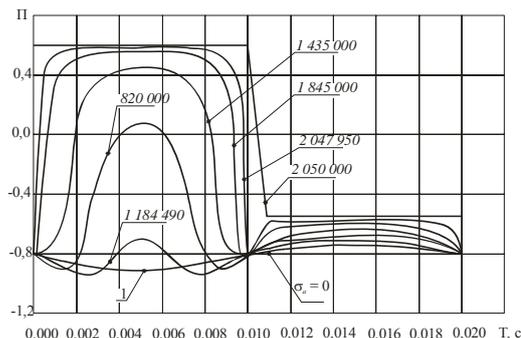


Рис. 6. Изменение показателя схемы напряженного состояния в пределах одного цикла для 1 – й серии; цифрами показан номер цикла усталостного нагружения

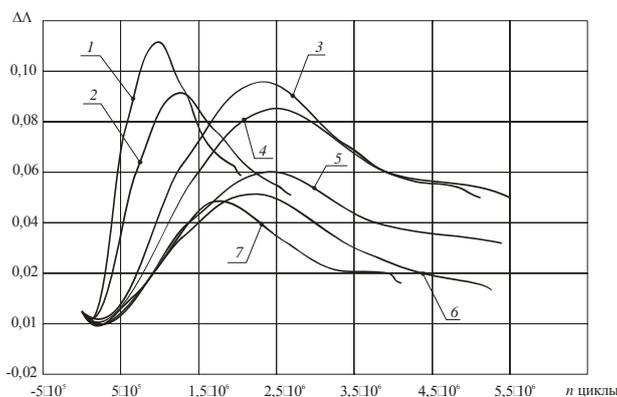


Рис. 7. Зависимости мгновенных деформаций сдвига от числа циклов усталостного нагружения: цифрами обозначены номера серий

Зависимость показателя схемы напряженного состояния от числа циклов имеет сложный характер (рис. 5). Видно, что в начальный период показатель схемы отрицателен, а размах его относительно среднего значения сравнительно незначителен. При $N \approx 118500$ циклов размах показателя схемы близок к нулю. При $N > 118500$ происходит существенное смещение показателя схемы в область более «жестких» схем в положительных полуциклах нагружения, и незначительное – в отрицательных полуциклах нагружения; в то же время увеличивается размах этого показателя относительно среднего значения. Полная релаксация остаточных напряжений и образование видимой трещины наступают при $-0,577 \leq \Pi \leq +0,577$, что соответствует схемам простого одноосного сжатия и растяжения соответственно.

Подобные закономерности обнаружены для всех исследуемых серий испытаний. Можно утверждать, что увеличение числа циклов в итоге приводит к более «жесткой» схеме напряженного состояния и увеличению размаха показателя схемы в каждом цикле нагружения. Кроме того, в 5 – 7 – й сериях обнаруживается более резкая тенденция в изменении показателя схемы при $N > 500000$ циклов нагружения.

Анализ показал, что показатель схемы в течение каждого из выбранных циклов усталостного нагружения изменяется в широких пределах. Несмотря на симметричный цикл напряжений нагрузки вследствие влияния остаточных напряжений, изменение показателя схемы в цикле имеет асимметричный характер (рис. 6).

Технологическое наследование выражается и в том, что уровень мгновенных деформаций по мере циклирования различен (рис. 7). Видно, что наибольший прирост деформаций для 1 – й серии происходит при числе циклов $N = 600000 - 1000000$. Увеличение уровня наследственной деформации (серии 2 – 4) приводит к уменьшению абсолютных мгновенных значений деформации и смещению их в область циклов $N = 1200000 - 2500000$. Дальнейшее увеличение уровня накопленной при механической обработке деформации еще более снижает уровень абсолютных мгновенных значений деформации и смещает их в область меньших циклов нагружения $N = 2400000 - 1700000$ (5 – 7 серии).

История нагружения влияет на скорость накопления деформаций. С увеличением наследственной деформации область программ усталостного нагружения сужается, что выражается в более пологом характере, меньшей накопленной на стадии циклической долговечности деформации при большей скорости изменения показателя напряженного состояния в каждом цикле и смещении всей ПН в область более «жестких» значений. Отсутствие начального упрочнения приводит к «жесткой» схеме нагружения при меньшей циклической долговечности изделия.

Кроме того, увеличение уровня наследственной деформации приводит к тому, что программа усталостного нагружения стартует с более «жестких» схем. Это еще раз говорит о едином характере влияния истории нагружения на последующее накопление деформаций независимо от метода воздействия на поверхностный слой изделия (резание, ППД, циклическое нагружение): чем больше наследуемая деформация, тем в большей мере программа нагружения на последующей стадии смещается в область более «жестких» значений.

История нагружения определяет и общий характер накопления деформации на стадии циклической долговечности (рис. 8). Чем больше наследственная деформация, тем меньше накапливаемая деформация на стадии циклической долговечности и тем меньше приращение степени деформации в одном цикле нагружения. Накопленная в цикле степень деформации сдвига определяется установленной программой нагружения, причем не является постоянной и изменяется в зависимости от истории (в том числе, усталостного) нагружения. В пределах каждого цикла от 2 до 5 раз происходит нарушение монотонности накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности.

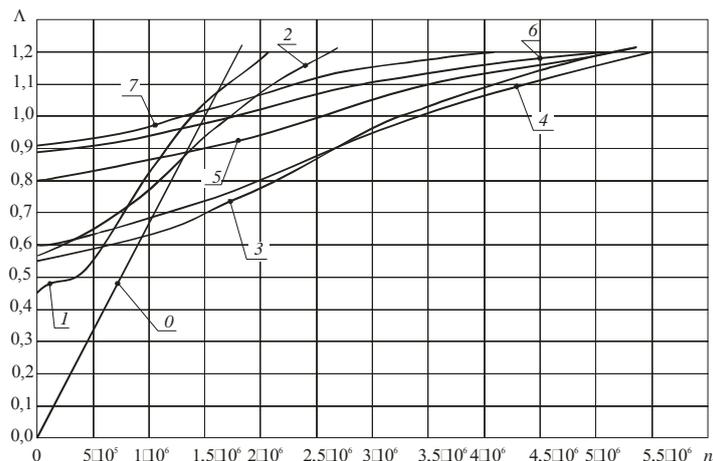


Рис. 8. Зависимости накопленной степени деформации сдвига от числа циклов усталостного нагружения: цифрами обозначены номера серий

Несмотря на то, что история нагружения оказывает влияние на долговечность и скорость накопления деформаций в каждом цикле, тем не менее, процесс исчерпания запаса пластичности подчиняется общим с механической обработкой закономерностям.

В заключение отметим, что разработанная методика расчета деформационных параметров на стадии циклической долговечности с учетом истории нагружения показала высокую достоверность (табл. 4).

Так, среднее квадратическое отклонение степени исчерпания запаса пластичности не превышает 0,068, а медианное значение этого показателя составляет 1,009.

Таблица 4

Результаты нагружения поверхностного слоя на стадии механической обработки (резания и ППД) и усталости в точках вероятного разрушения

| Номер серии | Механическая обработка | | Стадия циклической долговечности | |
|-------------|------------------------|---------------------|----------------------------------|--------------------|
| | $\Lambda_{\text{мех}}$ | $\Psi_{\text{мех}}$ | $\Lambda_{\text{цд}}$ | $\Psi_{\text{цд}}$ |
| 1 | 0,42 | 0,48 | 1,21 | 1,12 |
| 2 | 0,55 | 0,58 | 1,21 | 0,92 |
| 3 | 0,53 | 0,57 | 1,21 | 0,94 |
| 4 | 0,59 | 0,62 | 1,21 | 0,96 |
| 5 | 0,79 | 0,78 | 1,21 | 1,01 |
| 6 | 0,89 | 0,86 | 1,20 | 1,03 |
| 7 | 0,90 | 0,87 | 1,21 | 1,03 |

Выводы

1. Аппарат механики технологического наследования использован для описания накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности на стадии циклической долговечности от уровня, достигнутого после механической обработки. Предложен единый по структуре и физическому смыслу показатель схемы напряженного состояния для различных стадий и этапов нагружения – механической об

работки резанием и поверхностным пластическим деформированием и усталостного нагружения. Показатель схемы напряженного состояния рассчитывается исходя из тензоров наследственных остаточных напряжений и напряжений и усталостного нагружения.

2. Показано, что поверхностный слой изделия работает в условиях асимметрии цикла тем большей, чем больше остаточные напряжения. При этом остаточные напряжения независимо от их знака релаксируют в каждом цикле нагружения.

3. Разработана модель накопления деформации и исчерпания запаса пластичности металла на стадии циклической долговечности, в рамках которой накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности металла поверхностного слоя происходит при меняющемся от цикла к циклу, а также в пределах каждого цикла, показателе схемы напряженного состояния. Это обусловлено, прежде всего, релаксацией остаточных напряжений и их полным исчезновением в момент образования видимой усталостной трещины; в этот момент времени в опасном сечении действуют только усталостные напряжения.

4. Выполнены экспериментальные исследования влияния технологического наследования на состояние поверхностного слоя на стадии усталостного нагружения. Установлено влияние истории нагружения на характер накопления малых (неупругих) пластических деформаций на стадии циклической долговечности. Показан сложный немонотонный характер изменения напряженного состояния и соответствующего ему накопления деформаций и исчерпания запаса пластичности в каждом цикле усталостного нагружения.

5. Установлен единый характер влияния истории нагружения на последующее накопление деформаций независимо от метода воздействия на поверхностный слой изделия (резание, ППД, циклическое нагружение): чем больше наследуемая деформация, тем в большей мере программа нагружения на последующей стадии смещается в область более «жестких» значений.

6. Выполнены расчеты деформационных параметров на стадии циклической долговечности исходя из наследуемых степени деформации сдвига и степени исчерпания запаса пластичности. Показано, что разработанная методика расчета с учетом истории нагружения показала высокую достоверность.

Список литературы

1. Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975. 455 с.
2. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В. П. Когаев; под ред. А. П. Гусенкова. М.: Машиностроение, 1993. 346 с.
3. Кравченко Б. А., Папшев Д. Д., Колесников Б. И., Моренков Н. И. Повышение выносливости и надежности деталей машин и механизмов. Куйбышев: Куйбышевское книжное изд-во, 1966. 222 с.
4. Кудрявцев И. В. Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении. М.: Машгиз, 1951. 280 с. Кудрявцев И. В., Наумченко И. Е., Саввина И. М. Усталость крупных деталей машин. М.: Машиностроение, 1982. 247 с.
5. Маталин А. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машгиз, 1956. 452 с.
6. Махутов Н. А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука, 2008. 528 с.
7. Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. М.: Машгиз, 1962. 262 с.
8. Павлов П. А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. Л.: Машиностроение, 1988. 252 с.: ил.
9. Серенсен С. В. Сопrotивление металлов усталостному и хрупкому разрушению. М.: Атомиздат, 1975. 191 с.

10. Балтер М. А. Упрочнение деталей машин. М: Машиностроение, 1978. 184 с.
- Шнейдер Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. Л.: Машиностроение, 1982. 247 с.
11. Папшев Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка ППД. М.: Машиностроение, 1978. 152с.
- Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л. А. Хворостухин, С. В. Шишкин, И. П. Ковалев, Р. А. Ишмаков. М.: Машиностроение, 1988. 144 с.
- Шнейдер Ю. Г. Технология финишной обработки давлением: Справочник. СПб.: Политехника, 1998. 414 с.
12. Трошенко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом разрушении. Киев: Наукова думка, 1981. 343 с.
13. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
14. Кудрявцев П. И. Нераспространяющиеся усталостные трещины. М.: Машиностроение, 1982. 174 с.
15. Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. СПб.: Политехника, 1993. 391 с.
16. Можаровский М. С., Бобырь Н. И. Долговечность и пластичность материала при циклическом нагружении по различным траекториям в зависимости от вида предыстории нагружения // Проблемы прочности. 1979. № 12. С.1 – 5.
17. Гусев А. С. Сопrotивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках. М.: Машиностроение, 1989. 248 с.
18. Романов А. Н. Выбор материала при конструировании. Кинетические критерии разрушения при циклическом нагружении на стадиях образования и развития трещин // Инженерия поверхности. Приложение к журналу "Справочник. Инженерный журнал". М.: Машиностроение, 2001. №5. С. 33 – 38.
19. Алексеев Д. В., Казунина Г. А. Моделирование кинетики накопления повреждений вероятностным клеточным автоматом // Физика твердого тела. 2006. т.48, вып.2 . С. 255 – 261.
20. Achouri M.a b, Germain G.a, Dal Santo P.a, Saidane D.b. Experimental and numerical analysis of micromechanical damage in the punching process for High-Strength Low-Alloy steels. Materials and Design, 56, pp. 657-670. 2014 -. — Режим доступа: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84890821169&partnerID=40&md5=08e5eef727a1f24ba7218e40d2cab01a>, свободный – Загл. экрана.
21. Liu R.a, Salahshoor M.a, Melkote S.N.a, Marusich T.b. A unified internal state variable material model for inelastic deformation and microstructure evolution in SS304. Materials Science and Engineering A, 594, pp. 352-363. 2014.
22. Guan D.a, Sun Q.a, Yang F.b. A modified low cycle fatigue damage model for metals. Gutu Lixue Xuebao/Acta Mechanica Solida Sinica, 34 (6), pp. 571 – 578. 2014 – 2013 -. - Режим доступа:<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84892897573&partnerID=40&md5=cfc5c7bb15d2c22f39b66c3b52bffc34>, свободный – Загл. экрана.
- 23.
24. Kourousis K. I. A cyclic plasticity model for advanced light metal alloys. Applied Mechanics and Materials, 391, pp. 3 – 8. 2013. Режим доступа: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84886702626&partnerID=40&md5=c792032ce34029dedd7f78758abda40f>, свободный – Загл. экрана.
25. Шанявский А. А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации. Уфа: ООО «Монография», 2007. 500 с.
26. Shanyavskiy A. A. Mechanisms and modeling of subsurface fatigue cracking in metals. Engineering Fracture Mechanics, 110, pp. 350-363. 2013. Режим доступа:

- <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84885870112&partnerID=40&md5=8e244b727427e59b7ffcac8aba60f5c6>, свободный – Загл. экрана.
27. Mikheevskiy S.a , Glinka G.a, Lee E.b. Fatigue crack growth analysis under spectrum loading in various environmental conditions. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 44 (3), pp. 1301-1310. 2013. Режим доступа: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84877125298&partnerID=40&md5=56bd0dfaab829b6ddd6cb7d86806aee0>, свободный – Загл. экрана.
28. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
29. Трощенко В. Т., Жабко Н. И. Исследование влияния остаточных напряжений на закономерности неупругого циклического деформирования металлов в условиях неоднородного напряженного состояния // Проблемы прочности. 1979 № 8. С. 25 – 29.
30. Ящерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченков В. И. Технологическая наследственность в машиностроении. Минск: Наука и техника, 1977. 256 с.
31. Ящерицын П. И., Сосновский Л. А. Технологическая наследственность и сопротивление усталости деталей // Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. н. 1982. № 4. С. 44 – 49.
- Блюменштейн В. Ю. Наследственная механика стадии циклической долговечности. Известия Орел-ГТУ. Машиностроение. Приборостроение. №1. 2005. С. 26 – 28.
32. Блюменштейн В. Ю., Кречетов А. А. Модель процесса накопления деформации на стадии циклической долговечности // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. №4. С.11 – 13.
33. Блюменштейн В. Ю., Смелянский В. М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение-1, 2007. 400 с.
34. Сопротивление деформации и пластичность при обработке металлов давлением / Калпин Ю. Г., Перфилов В. И., Петров П. А. и др. М.: Машиностроение, 2011. 244 с.
35. Blumenstein V. Mechanics of Technological Inheritance. International journal for science and innovations for the industry Innovations in discrete productions issue. Year III, Issue 2/2015, Sofia. ISSN 1314-8907. 2015, №2, pp. 18 – 21.

**ASSESSMENT OF THE DURABILITY OF MACHINE PARTS STRENGTHENED
WITH PLASTIC DEFORMATION OF THE SURFACE
BASED ON THE MECHANICS OF TECHNOLOGICAL INHERITANCE**

Blyumenshtein V.Ju., Doctor of Science, professor; e – mail: blumenstein@rambler.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University 28 Vesennyyaya str., Kemerovo, 650000

Abstract

This article illustrates the mechanics of technological inheritance developed by the author. He developed the model of deformations accumulation and exhaustion of the metal plasticity reserve at the cyclic durability stage. Such model is based on the ideas relating to the index of stress condition diagram and consistent in terms of physics. It is shown that the type and numerical value of deformation parameters vary widely depending on the degree of strengthening and the tensor of inheritable residual stresses. The experimental study was carried out with the calculations to follow and it is shown that a set of methods developed in a context of a loading history is highly reliable.

Keywords: Strengthening, plastic deformation of the surface, cyclic durability, mechanics of technological inheritance, degree of shear strain, degree of plasticity reserve exhaustion.

УДК 621.983

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНО – ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ НЕСПЛОШНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*КУРЛАЕВ Н. В., доктор техн. наук,
РЫНГАЧ Н. А., канд. техн. наук, доцент,
БОБИН К. Н., канд. техн. наук
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Курлаев Н.В. – 630073, г. Новосибирск, Пр. К. Маркса 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e – mail: kurlaev@corp.nstu.ru

Аннотация

Моделируется влияние ударного и магнитно-импульсного нагружения на дефекты несплошностей деталей летательных аппаратов из алюминиевых сплавов. Для оценки воздействия импульсной обработки на объем пор используется оптимизационная характеристика импульс давления в зоне поры. Результаты моделирования обобщены в виде номограммы.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка, моделирование, пористость.

Введение

При применении технологических процессов изготовления деталей, связанных с пластическим деформированием, в структуре материалов неизбежно возникает деформационная пористость. При определенных режимах обработки объем пор, пустот и микротрещин, не достигших критического размера, можно уменьшить импульсной обработкой давлением, в том числе, импульсным магнитным полем (ИМП) [1]. Однако режимы импульсной обработки нуждаются в исследовании. При этом важно знать влияние основных факторов нагружения и способов их оптимизации.

Большое разнообразие методов и режимов обработки, в том числе магнитно-импульсной обработки (МИО), факторов воздействия, разброс исходных параметров материалов, разнообразие и сложность методов измерения полученных результатов затрудняют исследование механизма импульсного воздействия на материалы деталей и, зачастую, приводят к противоречивым и даже отрицательным результатам. В процессах импульсной обработки давлением материалов, в частности, при МИО необходим правильный выбор режимов чтобы уменьшить объем несплошностей деталей, и как следствие, чтобы увеличить усталостную долговечность деталей. При неправильном выборе параметров импульсной обработки может произойти снижение исходных эксплуатационных показателей. Для более точного исследования процессов импульсной обработки материалов возникает необходимость проведения математического моделирования, в основном, с помощью численных методов с соответствующей оптимизацией технологических режимов по основным факторам: амплитуда, форма и время действия импульсной нагрузки, а также коэффициент пористости и динамический предел текучести материала.

Описание теоретических исследований

Анализ процессов импульсной обработки производится на основе численного моделирования в рамках механики сплошной среды [1]. Используются уравнения, являющиеся следствием законов

сохранения массы, импульса и энергии. Замыкается система соотношениями упругопластического поведения материала Прандтля – Рейса. В качестве критерия пластичности используется критерий Мизеса. При моделировании МИО электромагнитная сила f_i будет входить в уравнения движения.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_i = v_i; \quad V_0 \rho_0 = V \rho; \quad \rho \dot{v}_i = \sigma_{ij,j} + f_i; \quad \rho \dot{e} = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}; \quad \sigma_{ij} = -\delta_{ij} p + s_{ij}; \\ p = p(\rho, e); \quad \dot{\varepsilon}_{ij} = 0,5(v_{i,j} + v_{j,i}); \quad \dot{s}_{ij} + \lambda s_{ij} = 2\mu \left(\dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{\dot{\varepsilon}_{ij} \delta_{ij}}{3} \right); \\ \lambda = 0 - \text{упругость}; \lambda > 0 - \text{пластичность}; \quad s_{ij} s_{ij} \leq \frac{2}{3} Y_0^2. \end{array} \right. \quad (1)$$

В системе уравнений (1): x_i - координаты материальных частиц, v_i - компоненты вектора скорости, ρ - плотность, V - объем, e - удельная внутренняя энергия σ_{ij} , s_{ij} , $\dot{\varepsilon}_{ij}$ - компоненты тензоров напряжений, дивергента напряжений и тензора скоростей деформаций соответственно, p - давление, δ_{ij} - символ Кронекера, μ - модуль сдвига, Y_0 - динамический предел текучести.

Численная реализация алгоритма для решения этих уравнений выполняется в рамках явной разностной схемы модифицированных методом типа Уилкинса [2]. В расчетной области строится разностная сетка из треугольных ячеек, в узлах которых определяются значения координат и скоростей, а в ячейках плотность, компоненты тензоров напряжений и скоростей деформаций, внутренняя энергия и т.д. Решение реализуется с помощью программного комплекса KRUG24 ИТПМ СО РАН.

В настоящей работе проводится численное моделирование импульсного воздействия на материал с порами, в частности, ударное воздействие и МИО давлением ИМП (Рис. 1).

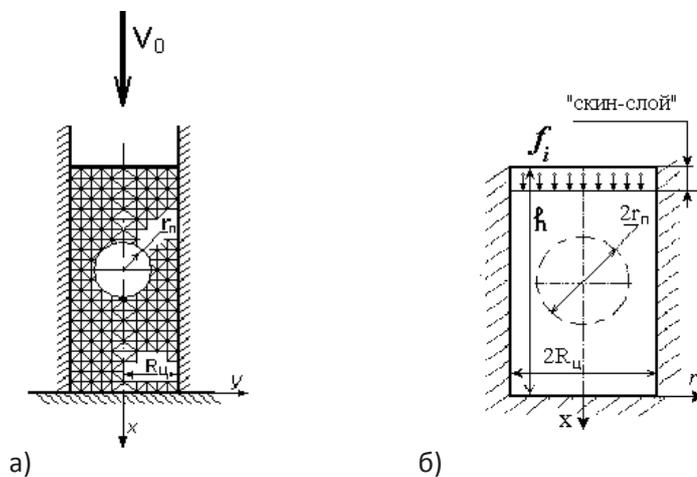


Рис. 1. Расчетные схемы: а) при ударном воздействии; б) при МИО

При ударе расчетной схемой является осесимметричный объем (цилиндр) с круглой порой на оси симметрии (см. Рис. 1, а). При моделировании импульсной нагрузки с помощью удара цилиндру задается начальная скорость v_0 и он контактирует с жесткой преградой. Боковая поверхность также является жесткой. От контактной поверхности цилиндра с преградой распространяется упругоплас-

тическая волна сжатия. При подходе к поре волна взаимодействует с ней, и происходит изменение объема поры.

При магнитно-импульсной обработке (см. Рис. 1, б) импульсная нагрузка, моделирующая воздействие ИМП, в виде удельной объемной силы (f_i) сконцентрирована в скин-слое, от которого аналогично воздействию поршня передается импульсное воздействие на материал цилиндра. Также возникает упругопластическая волна сжатия, воздействующая на пору. При этом для МИО характерно бесконтактное воздействие и возможность регулирования амплитуды и времени импульсной нагрузки.

Задачи импульсной обработки (см. Рис.1) рассматриваются для одной поры. Но можно ввести понятие пористости и использовать коэффициент пористости α , как характеристику материала:

$$\alpha = V_{\text{ПОР}} / V_{\text{ТЕЛА}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{ПОР}}$ – объем пор в расчетном элементе, $V_{\text{ТЕЛА}}$ – объем расчетного элемента. При этом используются: α_0 – исходная пористость и α_k – конечная пористость.

При решении задачи удара цилиндра из Al-сплава ($Y_0 = 300\text{МПа}$) с порой ($\alpha_0 \approx 0,015$) о жесткую преграду определялось изменение объема поры (Рис.2). При малых скоростях воздействие упругое и объем поры не меняется. При увеличении v_0 появляется изменение объема поры, причем остаточное. При достижении определенной скорости удара $v_0 = v_m$ пора смыкалась полностью. Скорость v_m является минимально необходимой для полного смыкания поры. При этом отмечалось, что время смыкания поры (от начала до окончания ее пластического деформирования) для различных v_0 требуется различное.

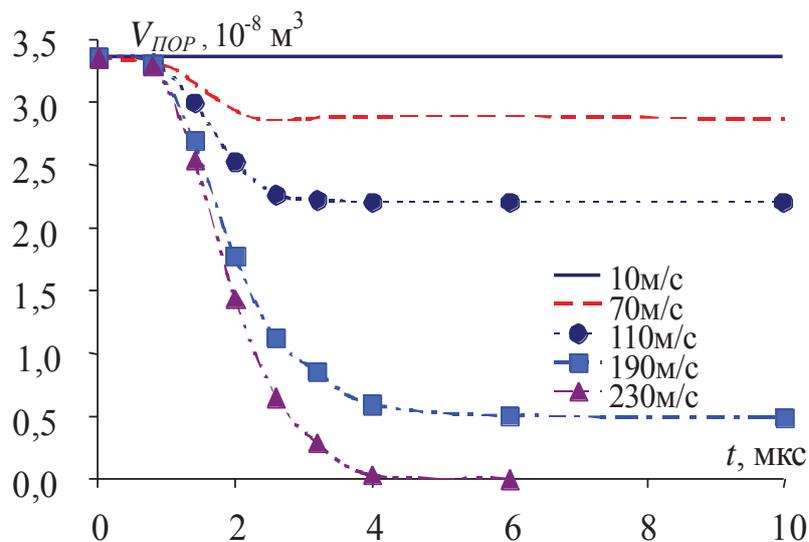


Рис.2. Изменение объема поры в Al – сплаве ($\alpha_0 = 0,015$, $Y_0 = 300\text{МПа}$) при различных скоростях удара

При исследовании зависимости $v_m(\alpha_0)$ для абсолютного размера пор установлено, что для различных радиусов пор (r_{II}) в телах с одинаковым коэффициентом пористости (α_0) примерно одинакова и минимально необходимая скорость удара (v_m). Результаты расчетов представлены на Рис. 3, из которого видно, что усредненная зависимость v_m от α_0 практически линейная.

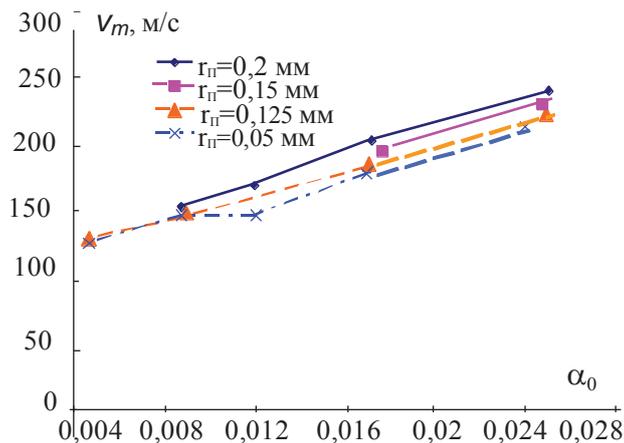


Рис. 3. Зависимость v_m от α_0

От момента удара тела с порой о жёсткую преграду до того как пора (поры) полностью или частично сомкнется и перестанет пластически деформироваться проходит определённый промежуток времени (см. Рис.2). Непосредственное время деформирования поры (всех пор), отсчитываемое от начала пластического деформирования до полного смыкания или окончания пластического деформирования, назовем временем смыкания и обозначим как t^* .

Численные расчеты показывают, что минимально необходимая для полного смыкания скорость удара v_m (см. Рис.3) и время смыкания пор t^* (Рис. 4) зависят линейно от исходной пористости α_0 и не зависят от размеров пор. Следует отметить, что это наблюдается как для одной поры, так и для множества пор (3, 6, 9 пор).

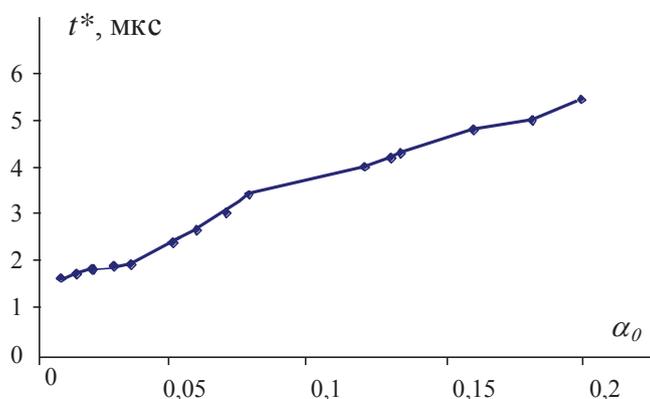


Рис. 4. Зависимость t^* от α_0

Как отмечалось в [1], при интенсивных нагрузках в импульсно нагружаемом элементе (см. Рис.1) шаровая часть (p) тензора деформаций (σ_{ij}) будет много больше девиаторной части (s_{ij}). Поэтому, часто при описании процесса в качестве характеристики напряженного состояния рассматривается только давление $p=p(\rho, e)$.

Изменение давления в зоне поры (p_n) при ударе (для $v_0 = 170$ м/с, $Y_0 = 200$ МПа, $\alpha_0 \approx 0,01$) показано на Рис.5, где более темные изобары соответствуют более высоким величинам давления. Фикси-

руя среднее значение давления в слоях на расстоянии $\leq 0,1r_0$ от границ поры в различные моменты времени t можем построить зависимость $p_{II}(t)$ (Рис. 6). На основании зависимостей $p_{II}(t)$ для различных амплитуд нагрузки (v_0) и соответствующего времени смыкания пор (t^*) (см. Рис.6) в качестве характеристики процесса смыкания пор можно ввести импульс давления в зоне поры (I_{II}), который имеет вид:

$$I_{II} = \int_{t^*} p_{II}(t) dt \quad (3)$$

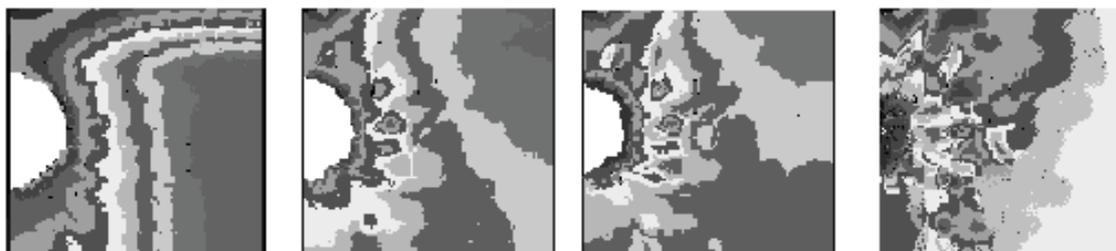


Рис.5. Типовая динамика развития давления (p_n) в зоне поры при ударе

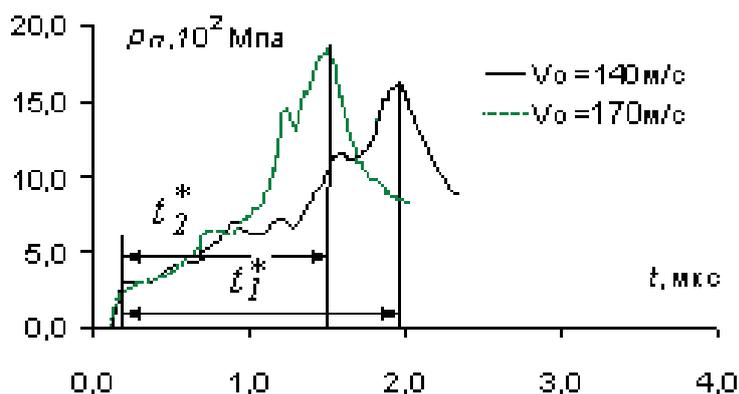


Рис.6. Зависимость развития давления в зоне поры $p_n(t)$:
 t_1^* и t_2^* – деформационное время смыкания
(при скоростях удара $v_0 = 140$ м/с и $v_0 = 170$ м/с, соответственно).

Импульс давления в зоне поры (I_{II}) зависит от исходной пористости, практически линейно возрастая при увеличении α_0 (Рис.7). Величина I_{II} также зависит от амплитуды нагрузки, в частности, от величины v_0 при ударе. Первоначально при увеличении v_0 величина I_{II} возрастает, при достижении $v_0 = v_m$ - минимальной скорости для полного смыкания поры импульс давления в зоне поры достигает максимального значения (Рис. 8).

При дальнейшем увеличении v_0 величина I_{II} уменьшается из-за большего влияния инерционных сил. Таким образом, максимальное значение I_{II} соответствует минимальной нагрузке необходимой для полного смыкания пор. Отметим, что это свойство можно использовать для постановки задач оптимизации.

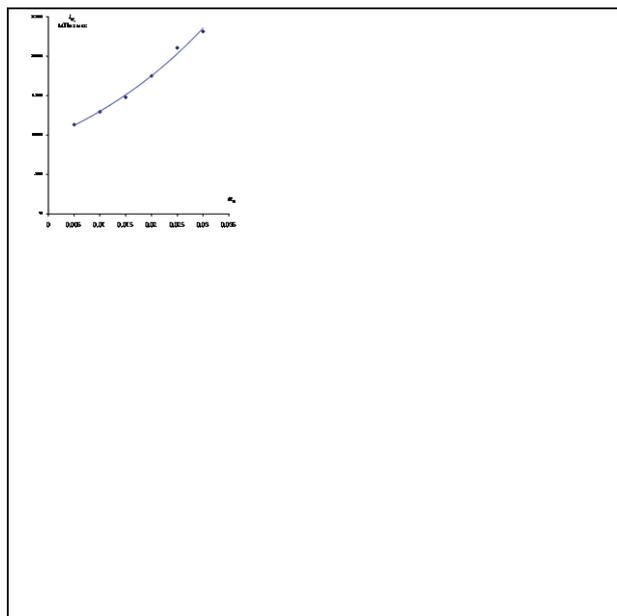


Рис.7. Зависимость импульса давления смыкания пор I_{Π} от α_0

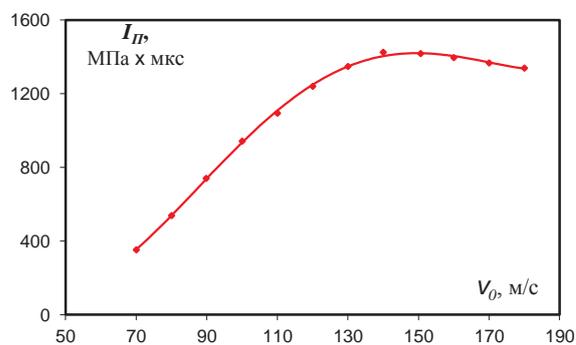


Рис.8. Зависимость $I_{\Pi}(v_0)$

При моделировании воздействия ИМП (см. Рис. б) принимаем схему МИО с помощью плоского индуктора (Рис. 9). Электромагнитная сила

$$f_i = |\vec{j} \times \vec{B}|, \quad (4)$$

как сила, действующая на единицу объема в скин-слое (см. Рис1.а), будет входить в уравнение изменения импульса ($\rho \dot{v}_i = \sigma_{ij,j} + f_i$), где f_i в общем случае имеет составляющие f_x, f_y, f_z .

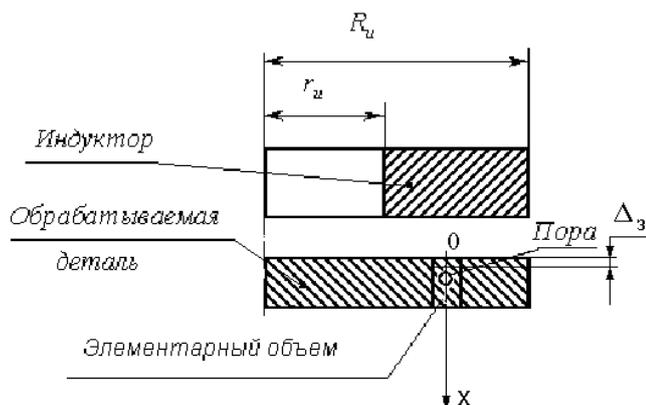


Рис.9. Схема взаимного расположения детали, содержащей расчетный элементарный объем с порой, и шины плоского индуктора (R_u и r_u - внешний и внутренний радиусы шины) при обработке ИМП

Принимается, что сила ИМП действует по оси x , которая совпадает с осью симметрии цилиндрического элемента. Поэтому все составляющие f_i , кроме одной (f_x), будут равны нулю.

В соответствии с известными соотношениями для индукции ИМП $B(x,y,t)$ и плотности тока $j(x,y,t)$ [26], -

$$B(x,y,t) = B_m \cdot \exp\left(-\frac{x}{\delta_3}\right) \cdot \sin\left(\omega t - \frac{x}{\delta_3}\right) \quad (5)$$

$$\text{и } j(x,y,t) = \frac{B_m \sqrt{2}}{\mu_0 \delta_3} \exp\left(-\frac{x}{\delta_3}\right) \sin\left(\omega t - \frac{x}{\delta_3} + \frac{\pi}{4}\right) \quad (6)$$

- уравнение электромагнитной силы f_i имеет вид:

$$f_x(x,y,t) = \frac{B_m^2 \sqrt{2}}{\mu_0 \delta_3} \exp\left(-\frac{2x}{\delta_3}\right) \sin\left(\omega t - \frac{x}{\delta_3} + \frac{\pi}{4}\right) \sin\left(\omega t - \frac{x}{\delta_3}\right), \quad (7)$$

где B_m – максимум магнитной индукции на поверхности детали; δ_3 – толщина скин – слоя заготовки; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума ($\mu_0 = 1,257$ мкГн/м); ω – частота разрядного контура.

Толщина скин – слоя заготовки или индуктора ($\delta_{3,И}$), другие величины, входящие в уравнение (3.7), определяются известными электрическими соотношениями для МИО [25]:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{3,И} &= \sqrt{2/\mu_0 \gamma_{3,И} \omega}; \\ B_m &= \frac{\mu_0 I_m n_{И}}{l_p}; \\ I_m &= \sqrt{\frac{2W_H}{L}}; W_H = \frac{CU^2}{2} = \frac{LI^2}{2}; L = L_c + L_{И-3} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

$$\text{с геометрическими параметрами: } l_p = R_{И} - r_{И}; x \leq \delta_3, \quad (9)$$

где $\gamma_{3,И}$ – удельная электропроводимость материала заготовки или индуктора, I_m – амплитуда тока; W_H – накапливаемая энергия заряда магнитно-импульсной установки (МИУ); L – общая индуктивность (L_c – индуктивность МИУ, $L_{И-3}$ – индуктивность системы "индуктор-заготовка"); $n_{И}$ – число витков индуктора; l_p – ширина токовой полосы индуктора.

Индуктивность системы "индуктор-заготовка" вычисляется в зависимости от магнитного объема (V_M) по упрощенной формуле, предложенной в работе [3]:

$$L_{И-3} = \frac{\mu_0 V_M n_{И}}{l_p}. \quad (10)$$

Магнитный объем (V_M) определяется из следующего выражения:

$$V_M = (h_B + \delta_{И} + \delta_3) S_{И}, \quad (11)$$

где h_B – толщина воздушного зазора между индуктором и заготовкой, а $S_{И}$ – площадь обработки индуктором

В качестве характеристики магнитно-импульсного нагружения используем удельную энергию МИУ:

$$w^* = W_H / S_H \quad (12)$$

Аналогично ударному нагружению при МИО существуют минимально необходимые нагрузки ИМП, при которых достигается полное смыкание пор. Типовой пример изменения динамики объема поры ($\alpha_0 \approx 0,01$) для Al-сплава ($Y_0 = 200$ МПа) представлен на Рис.10, отражающем динамику сокращения объема поры во времени при различной энергии МИО. Расчеты производились для индуктора с числом витков $n_H = 1$, с шириной токовой полосы $l_p = 20$ мм и с площадью обработки $S_H \approx 22,4$ см².

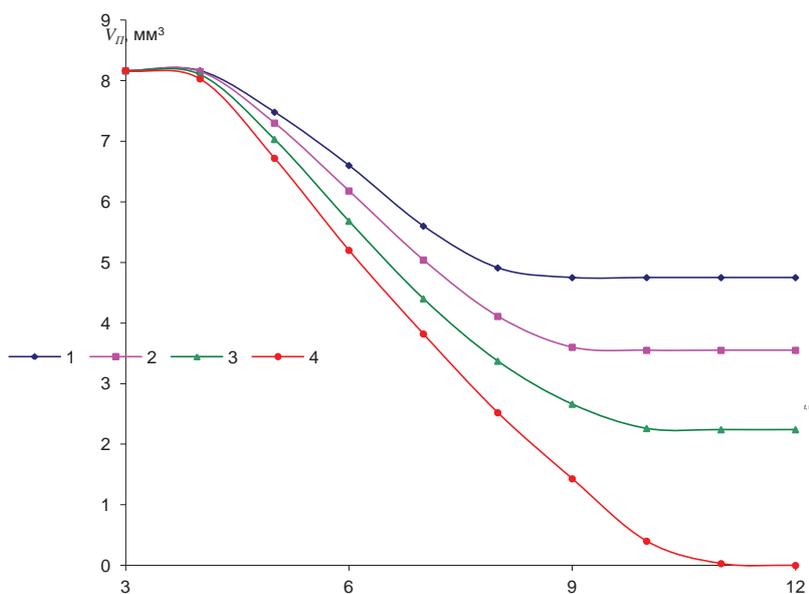


Рис. 10. Динамика изменения объема поры ($\alpha_0 \approx 0,01$) при МИО:
1 – $w^* = 3,21$ Дж/мм²; 2 – $w^* = 3,57$ Дж/мм²; 3 – $w^* = 3,97$ Дж/мм²; 4 – $w^* \approx 4,53$ Дж/мм²

Изменение давления в зоне поры при ударе и при МИО аналогичны друг другу. Зависимости $p_H(t)$ для различных амплитуд, времени действия нагрузки при различных методах импульсной обработки, – ударе и МИО, – показаны в виде сравнительных графиков на Рис.11.

На Рис.11. представлено: во-первых, развитие давления в зоне поры во времени ($p_H(t)$) на тело с пористостью $\alpha_0 = 0,01$ при различных скоростях удара $v_0 = 140$ м/с – ряд 1, и $v_0 = 170$ м/с – ряд 2. Во-вторых, сравнивается МИО при различных энергиях заряда МИУ: $W_H = 10,2$ кДж – ряд 3 и $W_H = 13,4$ кДж – ряд 4, при одинаковом времени воздействия ИМП ($\tau = 20$ мкс). В-третьих, для МИО показаны графики $p_H(t)$ при различном времени действия ИМП (полное смыкание пор во всех случаях достигается): ряды 3 и 4 – при $\tau = 20$ мкс; ряд 5 – при $\tau = 36$ мкс, ряд 6 – при $\tau = 50$ мкс.

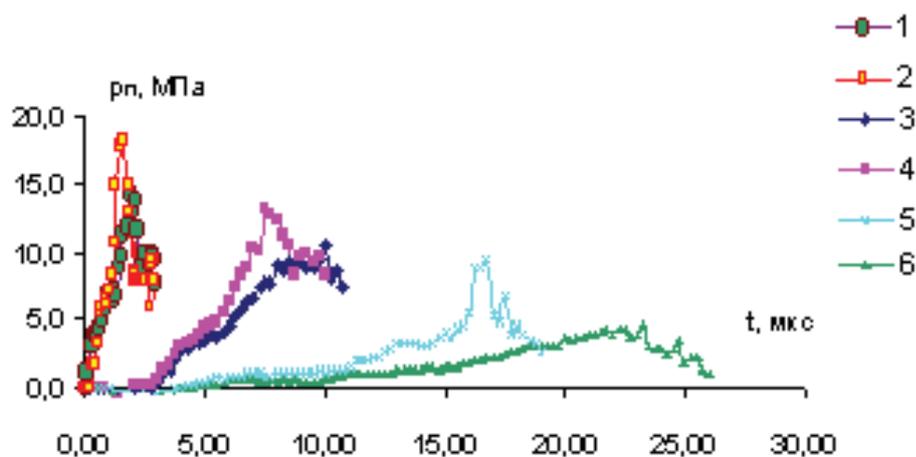


Рис. 11. Развитие давления в зоне поры при ударе:
ряд 1 – 140 м/с; ряд 2 – 170 м/с; и при воздействии ИМП: ряд 3 - $\tau = 20$ мкс
(при $W_H = 10,2$ кДж); ряд 4 - $\tau = 20$ мкс (при $W_H = 13,4$ кДж); ряд 5 - $\tau = 36$ мкс;
ряд 6 - $\tau = 50$ мкс

Пользуясь данными $p_{II}(t)$, представленными на Рис. 11, и пользуясь соотношением (3) построим зависимость импульса давления в зоне поры от времени смыкания t^* (Рис.12) для величин нагрузок минимально необходимых для полного смыкания пор.

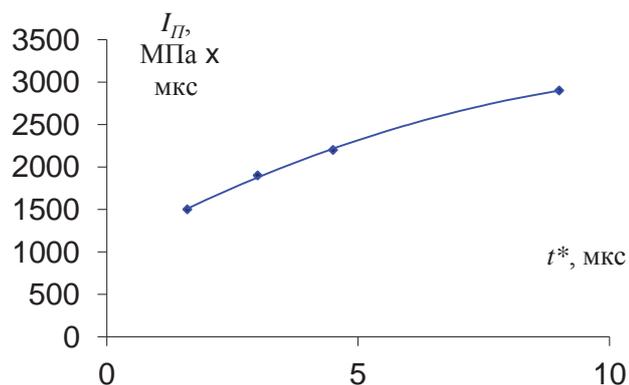


Рис. 12. Зависимость импульса давления в зоне поры I_{II} от времени её смыкания t^*

При построении зависимости импульса давления в зоне поры I_{II} во время её смыкания t^* (см. Рис.12) определено, что для более растянутого времени импульсного воздействия величина импульса давления в зоне поры $I_{II}(t^*)$ требуется больше. Это говорит об уменьшении влияния инерционных сил. Это характерно как для ударного воздействия, так и для МИО.

Очевидно, что импульс давления в зоне поры (I_{II}) является характеристикой, объединяющей разные процессы импульсного нагружения. Зависимость $I_{II}(t^*)$ (см. Рис.12) для импульсных нагрузок, минимально необходимых для полного смыкания пор, является единой для удара и МИО. Таким образом, по импульсу давления в зоне поры можно определить характеристику процесса независимо от вида нагружения.

При построении зависимости $I_{II}(w^*)$ (Рис.13) определено, что аналогично зависимости $I_{II}(v_0)$ (см. Рис.5), импульс давления в зоне поры сначала растет при росте амплитуды импульсной нагрузки, а затем начинает убывать.

При этом максимальное значение I_{II} соответствует минимальной нагрузке необходимой для полного смыкания пор при МИО. Это свойство импульса давления в зоне поры (I_{II}), как характеристики процесса импульсной обработки, можно использовать для постановки задач оптимизации требуемой величины энергии заряда накапливаемой МИУ.

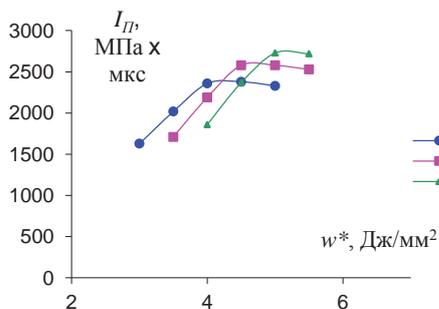


Рис.13. Зависимость $I_{II}(w^*)$ для МИО Al – сплавов при $\tau \approx 20$ мкс:
1 - $Y_0 = 100$ МПа; 2 - $Y_0 = 200$ МПа; 3 - $Y_0 = 300$ МПа

Для определения энергетических режимов МИО, требуемых для уменьшения пористости, предлагается инженерная методика сведения результатов численных расчетов и оптимизации амплитуды импульсной нагрузки в номограмму (Рис.14).

По номограмме в зависимости от свойств обрабатываемого материала (α_0 , Y_0 и удельного электрического сопротивления - $\rho_{эл}$), параметров индуктора (n_{II} и l_p), требуемой степени смыкания пор ($q^* = 1 - \alpha_K/\alpha_0$) определяется удельная энергия МИУ, приведенная к площади обработки индуктором (w^*).

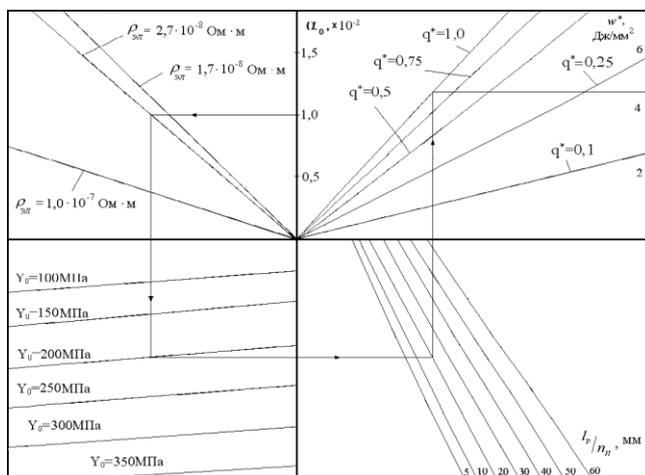


Рис.14. Номограмма определения энергетических режимов обработки ИМП (w^*) типовой МИУ (с собственной частотой $f_c \sim 20 \div 25$ кГц) для различных сплавов ($\rho_{эл}$, Y_0) с различной исходной пористостью (α_0) и заданным коэффициентом смыкания ($q^* = 1 - \alpha_K/\alpha_0$) при обработке индукторами с числом витков n_{II} и шириной токовой полосы l_p

Выводы

Проделанная работа позволяет сделать выводы:

- при математическом моделировании импульсной обработки давлением, применяемой для уменьшения объема несплошностей в материалах деталей из алюминиевых сплавов, определено, что результаты расчетов не зависят от размера и количества пор. Решая задачи об одной поре можно обобщать результаты через коэффициент пористости α ;
- оптимизационная характеристика импульс давления в зоне поры (I_{II}) позволяет получать параметры процесса смыкания пор независимо от вида импульсного нагружения;
- результаты численного моделирования и оптимизации параметров импульсной нагрузки можно обобщить в виде номограмм для инженерных расчетов по определению требуемых технологических режимов.

Список литературы

1. Курлаев Н.В., Гулидов А.И., Юдаев В.Б., Рынгач Н.А. Моделирование воздействия ИМП на несплошности в структуре материалов деталей // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2003.- №2. - С.80 – 86.
2. Курлаев Н.В., Гулидов А.И., Мержиевский Л.А., Рынгач Н.А. Влияние импульсной обработки на дефекты сплошности и долговечность материалов // Научный вестник НГТУ.- Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2005. - №1 (18). – С.97 – 110.
3. Белоусов В.С. Физические основы лазерной и магнитно-импульсной обработки.- Новосибирск: НЭТИ, 1991. – 63с.

THE USE OF ELECTROMAGNETIC PULSE PROCESSING FOR REDUCING THE VOLUME OF CAVITY DEFECTS POROSITY IN AIRCRAFT PARTS

Kurlaev N.V., Doctor of Technics, e – mail: kurlaev@corp.nstu.ru

Ryngach N.A., Candidate of Technics, e – mail: ryngach@corp.nstu.ru

Bobin K.N., Candidate of Technics, e – mail: bobin@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630073, Russia

Abstract

The influence of churn and magnetic-pulse loading of cavity defects porosity of the aluminum alloy parts is calculated. The optimality characteristic pressure pulse in and around pore is used for confirmation of the influence of magnetic-pulse processing the volume of cavity defects porosity. Result of modeling is generalized in nomogram.

Keywords: magnetic-pulse processing, mathematical model, defects.

УДК 621.9.04

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ МНОГОГРАННЫХ
ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН НА ШЛИФОВАЛЬНО-ЗАТОЧНЫХ
СТАНКАХ С ЧПУ**

*ВАСИЛЬЕВ Е. В., канд. техн. наук, доцент,
ПОПОВ А. Ю., доктор техн. наук, профессор
(ОмГТУ, г. Омск, Россия)*

Васильев Е.В. – 644050, г. Омск, пр. Мира, 11,
Омский государственный технический университет,
е – mail: wasilyev_@mail.ru

Аннотация

Рассматриваются различные формы затачивания радиуса при вершине многогранных твердосплавных пластин. Разработана схема формообразования задней поверхности многогранной твердосплавной пластины, совершающей вращательное движение вокруг своей оси и возвратно поступательное движение относительно рабочей поверхности шлифовального круга. Применение полученных зависимостей на шлифовально-заточном оборудовании с ЧПУ позволило осуществлять шлифование задней поверхности многогранных твердосплавных пластин с высокой производительностью и точностью получаемых геометрических параметров.

Ключевые слова: формообразование, многогранная твердосплавная пластина, шлифовальный круг, шлифование, затачивание, надежность, погрешность, державка, кинематическая схема, движения.

Введение

Перетачивание многогранных твердосплавных пластин (МП) – это сложная научно – техническая задача, решение которой, возможно, в большинстве случаев, на основе комплексного исследования влияния геометрии режущей части инструмента на стойкость и другие эксплуатационные свойства, обоснованного и эффективного использования способов повышения стойкости и обеспечения минимальных затрат при перетачивании и дальнейшей подготовки МП к эксплуатации.

Перетачивание МП всегда связано с уменьшением размеров и изменением их геометрии. Уменьшение размеров по высоте приводит к снижению надежности МП, то есть повышению вероятности поломки, что не допустимо в массовом производстве. Уменьшение размеров МП по диаметру вписанной окружности и высоте может привести к снижению надежности крепления и необходимости дорабатывать корпуса инструментов, в которых производится их закрепление переточенных твердосплавных пластин.

Допускаемая погрешность радиуса при вершине МП у производителей инструмента допускается $\pm 0,1$ мм. В условиях контурного точения данная погрешность оказывает значительное влияние на точность получаемых размеров, так как обработка осуществляется по эквидистанте.

Высокую точность получаемых размеров на многогранных твердосплавных пластинах, возможно получить на шлифовально – заточном оборудовании с ЧПУ. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Определить рациональную геометрию режущей части МП.
2. Разработать схему формообразования задней поверхности МП.

Возможны различные формы затачивания вершины МП (рис. 1 – 2) [1].

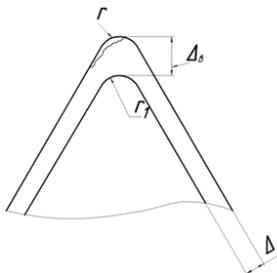
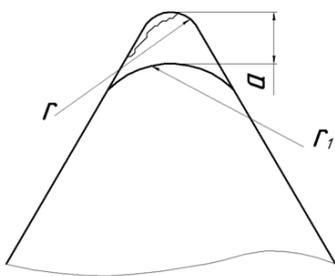
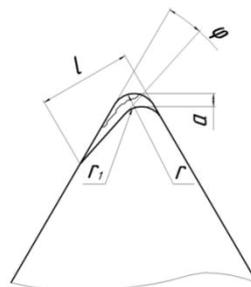


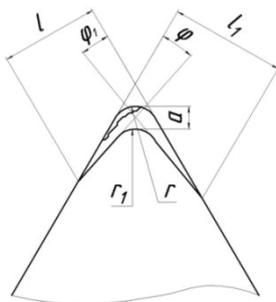
Рис. 1. Затачивание пластин по контуру на величину Δ с сохранением радиуса $r = r_1$



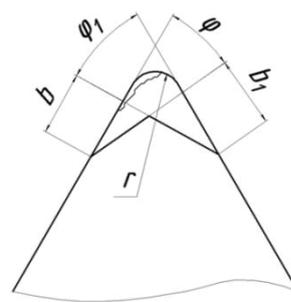
а. Увеличение радиуса r при вершине на r_1



б. Затачивание дополнительного главного угла в плане ϕ с сохранением исходного радиуса $r = r_1$



в. Затачивание дополнительных углов в плане ϕ и ϕ_1 с сохранением исходного радиуса $r = r_1$



г. Затачивание фасок при вершине вместо исходного радиуса r

Рис. 2. Варианты конфигурации переточенных МП

Перетачивание по задней поверхности изменяет конфигурацию и размеры контура МП. Изменение геометрии, т.е. углов в плане, изменяет условия резания. Изменение радиуса при вершине изменяет радиус на галтелях детали и в случае круговой интерполяции дает погрешность размеров

детали. Изменение размеров контура МП приводит к изменению условий её закрепления в корпусе инструмента.

Производители режущего инструмента обеспечивают гарантированное свисание пластины над гнездом державки до 0,5 мм, тем самым обеспечивают запас на переточку. В случае, когда износ превышает данную величину необходимо изготавливать новый комплект державок для закрепления пластин. Отсутствие свисания тоже считается нормой. На твердосплавных пластинах разной конфигурации перетачивание по контуру дает различное изменение исполнительного размера в корпусе сборного инструмента. Конструктивные особенности корпуса державки, предусматривают возможность осевой и радиальной компенсации при фиксации режущей пластины. Таким образом, основным негативным результатом переточки по контуру может быть изменение условий закрепления пластины в корпусе инструмента и выступание опорной пластины или поверхности гнезда за габариты переточенной твердосплавной пластины.

Для разработки управляющих программ на шлифовально-заточных станках с ЧПУ необходимо рассмотреть схему формообразования задней поверхности МП совершающей вращательное движение вокруг своей оси и возвратно поступательное движение относительно рабочей поверхности шлифовального круга (И).

С целью разработки алгоритма реализации схемы формообразования задней поверхности МП проанализируем ее положения относительно И (рис. 3).

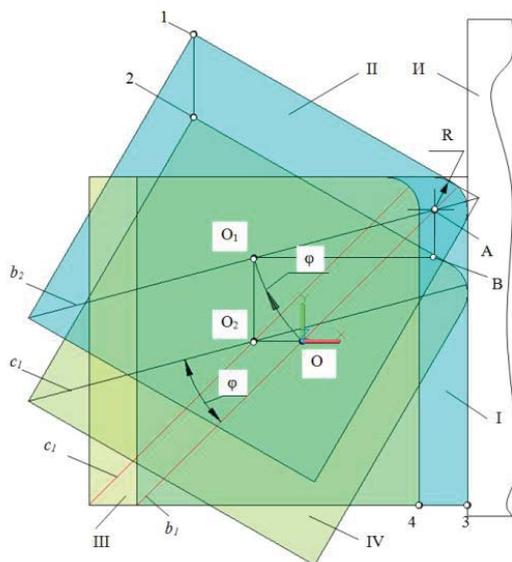


Рис. 3. Модели заготовки и инструмента для различных их взаимных расположений

В начальный момент формообразования задней поверхности МП её ребро находится в положении I. При формообразовании ребра МП вращается вокруг точки А. После поворота МП на угол φ , она займет положение II. Тогда центр О после поворота переместится в точку O_1 . В этом случае после среза части припуска МП и И будут касаться по некоторой образующей. По этой же образующей они будут касаться, если МП переместить вдоль И на величину O_1O_2 . Тогда центры О и O_2 в различные промежутки времени будут находиться на линии возврата – поступательного перемещения МП относительно И. Тогда из рис. 3 следует, что для того чтобы МП совершала указанное возвратно – поступательное перемещение и вращательное вокруг оси, проходящей через центр О (для его различных положений) нужно:

1. сместить МП относительно И в новое положение III на величину, равную OO_2 ;
2. повернуть заготовку III вокруг центра O_2 на угол φ ;
3. заготовка III займет положение IV такое же, что и при линейном смещении заготовки из положения II.

Описанная последовательность действий определяет алгоритм реализации третьей кинематической схемы формообразования МП И средствами САПР. Для разработки программы, в соответствии с данным алгоритмом, требуется установить связь между соответствующим поступательным и вращательным движением заготовки.

Вначале определяем расстояние между точками OA, которое равно

$$|OA| = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}, \quad (1.1)$$

где $X_A = H - R$, а $Y_A = H - R$.

Так как $OA = O_1A$, то из треугольника ABO_1 имеем

$$|AB| = |OA| * \sin(45 - \varphi), \quad |O_1B| = |OA| * \cos(45 - \varphi). \quad (1.2)$$

Следовательно, координаты центра O_1 определяются из зависимостей:

$$X_{o_1} = X_A - |O_1B|, \quad Y_{o_1} = Y_A - |AB|. \quad (1.3)$$

Тогда координаты центра O_2 заготовки при её возвратно-поступательном перемещении будут

$$X_{o_2} = X_{o_1}, \quad Y_{o_2} = 0 \quad (1.4)$$

Подставляя в выражения (2.4) зависимости (2.1 – 2.3), получим

$$X_{o_2} = X_A - \sqrt{X_A^2 + Y_A^2} * \cos(45 - \varphi), \\ Y_{o_2} = 0.$$

Приведенный алгоритм и зависимости явились основой для разработки соответствующих программ моделирования формообразования задней поверхности МП. Результаты моделирования представлены на рис. 4

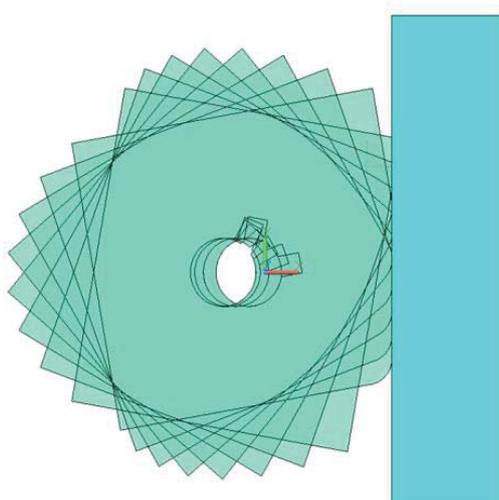


Рис. 4. 2D – модель формообразования задней поверхности МП относительно И

На рис. 5 представлены МП изношенная и переточенная. Промышленные испытания переточенного инструмента показали сохранение периода стойкости в сравнении с новыми МП.

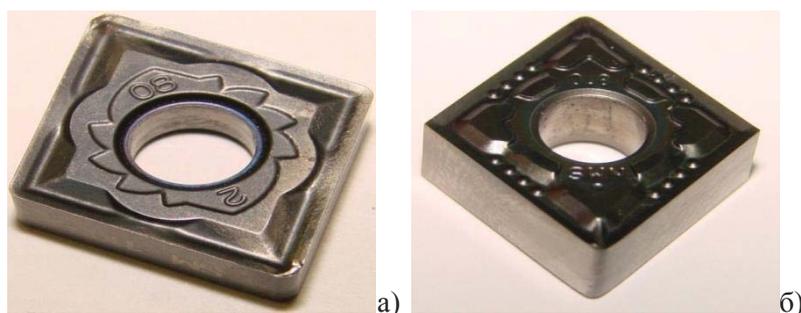


Рис. 5. Многогранная твердосплавная пластина: а- изношенная, б- переточенная

Выводы

Применение полученных зависимостей на шлифовально – заточных станках с ЧПУ позволили осуществить формообразование задней поверхности МП с высокой производительностью (до 80 штук в час) и точностью (погрешность радиуса при вершине МП не более 5мкм.) С целью снижения шероховатости поверхности на радиусе при вершине МП следует добавить возвратно – поступательное движение шлифовального круга относительно затачиваемого инструмента.

Список литературы

1. Васильев Е.В. Определение рациональной геометрии режущей части переточенных твердосплавных пластин, предназначенных для черного точения / Васильев Е.В., Попов А.Ю. // СТИН. –2014. – № 2. С. 16 – 21.
2. Васильев Е.В., Балмасова. Е.А. Способ шлифования плоских поверхностей // Пат. 2359804 РФ, МПК В24В 7/00. - № 2007119523/02; Заявлено 25.05.07; Оpubл. 27.06.09. Бюл. № 18.
3. Васильев Е.В., Попов А.Ю. Шлифовальный станок // Пат. 50903 РФ, МПК В24В27/04. - № 2005127172/22; Заявлено 29.08.05; Оpubл. 27.01.06. Бюл. № 24

4. Васильев Е.В., Попов А.Ю. Приспособление для наружного шлифования // Пат. 62553 РФ, МПК В24В 27/04. - № 2006130631/22; Заявлено 24.08.06; Оpubл. 27.04.07. Бюл. № 12.
5. Васильев Е.В., Попов А.Ю. Приспособление для наружного шлифования // Пат. 148856 РФ, МПК В24В 27/00. - № 2014124473/02; Заявлено 16.06.2014; Оpubл. 20.12.2014. Бюл. № 35.
6. Васильев Е.В. Повышение производительности алмазного шлифования твердосплавных изделий и ресурса кругов выбором оптимальных схем и режимов шлифования и характеристики круга: автореф. дис. канд. техн. Наук. – Омск, 2005 – 20 с.

MODELING OF THE PROCESS OF GRINDING MULTIDIMENSIONAL PLATES ON THE GRINDING – GRINDING MACHINES WITH NUMERICAL SOFTWARE CONTROL

Vasiliev E.V. C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e – mail: wasilyev_@mail.ru

Popov A.Yu. D. Sc. (Engineering), Professor, e – mail: popov_a_u@list.ru

Omsk State Technical University, prospekt Mira, 11, Omsk, 644050 Russian Federation

Abstract

Various forms of honing the radius at the apex of polyhedral carbide plates are considered. A scheme for the formation of the rear surface of a multi-sided carbide plate, which rotates about its axis and reciprocates with respect to the working surface of the grinding wheel, is developed. The use of the obtained dependences on grinding and grinding equipment with CNC allowed grinding the back surface of polyhedral carbide plates with high productivity and accuracy of the obtained geometric parameters.

Keywords: forming, multi-sided carbide plate, grinding wheel, grinding, honing, reliability, error, holder, kinematic scheme, movements.

СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

*РАХИМЯНОВ Х. М. доктор техн., наук, профессор
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Рахимьянов Х.М. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: x.raximyanov@corp.nstu.ru

Аннотация

Рассмотрены проблемы обработки деталей, выполненных из высокопрочных металлов и сплавов. Показана эффективность использования электрофизических методов обработки, в частности, электрохимического формообразования. Выявлены ограничения в достижении высокой производительности процесса, связанные с развитием диффузионных и пассивационных явлений в зоне обработки. Установлено, что для значительного круга труднообрабатываемых материалов устранение пассивационных ограничений возможно при комбинировании электрохимической обработки с другими физическими процессами, в частности, механическим резанием. Показана перспективность нового метода – лазерно – электрохимической обработки, реализующей комплекс механизмов интенсификации анодного растворения.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, диффузионные ограничения, пассивационные процессы, электроалмазное шлифование, лазерно – электрохимическая обработка, механизмы активации.

Введение

Технологические процессы изготовления продукции машиностроительного назначения ориентированы, как правило, на обеспечение формообразования поверхностей деталей с достижением требуемой точности и качества обработки. Традиционно технологические методы формообразования деталей, выполненных из конструкционных материалов, основаны на процессах механического резания. Теория и практика последних получили достаточное развитие, что обеспечивает понимание механизмов разрушения металлов и сплавов для создания эффективных схем формообразования поверхностей, проектирования технологического оборудования и инструментального оснащения. Однако, постоянный поиск путей создания конструкционных материалов с повышенным комплексом прочностных характеристик, определяющих показатели эксплуатационной надежности и долговечности изделий, привел к появлению проблем в механической обработке высокопрочных материалов.

Таким образом, появление высокопрочных конструкционных материалов объясняет необходимость в расширении арсенала технологических методов обработок с использованием иных методов формообразования. Для решения поставленных задач весьма эффективными представляются электрофизические методы обработки. В первую очередь, к данным технологиям формообразования следует отнести электрохимическую, электроэрозионную обработки. В основе электрофизических методов формообразования лежат не процессы разрушения обрабатываемого материала, а его электрохимическое растворение либо удаление материала с поверхности в жидкой или паро – газообразной фазе за счет его локального расплавления и испарения. Обрабатываемость материала при использовании этих технологий определяется не уровнем его прочностных характеристик, а иными параметрами – электрохимическими и теплофизическими характеристиками.

Однако для эффективного использования электрофизических технологий в процессах формообразования деталей необходимо выявление существующих ограничений и предложение путей для их устранения.

В настоящей статье сделана попытка обобщения результатов научной деятельности кафедры технологии машиностроения Новосибирского государственного технического университета по разработке и внедрению в производство различного рода электрофизических технологий обработки деталей машин и инструментов.

Анализ и обсуждение результатов

В современных процессах формообразования поверхностей деталей, выполненных из труднообрабатываемых металлов и сплавов, широкое распространение получила электрохимическая размерная обработка, основанная на процессах анодного растворения материала в условиях высокой локализации процесса. В работах [1 – 14] показана эффективность процессов анодного растворения широкого класса материалов, начиная с быстрорежущих сталей Р6М5 [2], Р12Ф3К10М2 [10], Р9К5 [13], покрытий на их основе с добавлением упрочняющей фазы [12, 14], порошковых материалов [3], включая и наноструктурированные [1], аморфных сплавов [9], безвольфрамовых твердых сплавов [4], нержавеющей сталей [6], специальных сталей [5, 11], а также цветных металлов [7, 8].

Поляризационные исследования широкого класса материалов показали на существование определенных барьеров в процессе электрохимического растворения, связанных как с пассивационными явлениями, так и диффузионными ограничениями. Если первые возникают вследствие образования различного рода окисных пленок на обрабатываемой поверхности, то диффузионные ограничения связаны с ее экранированием продуктами электрохимических реакций. На рис. 1 представлены поляризационные кривые, полученные потенциодинамическим методом, при электрохимическом растворении ряда исследованных материалов. Для всех зависимостей плотности тока от потенциала анода характерно наличие зон активного, пассивного и транспассивного растворения обрабатываемого материала.

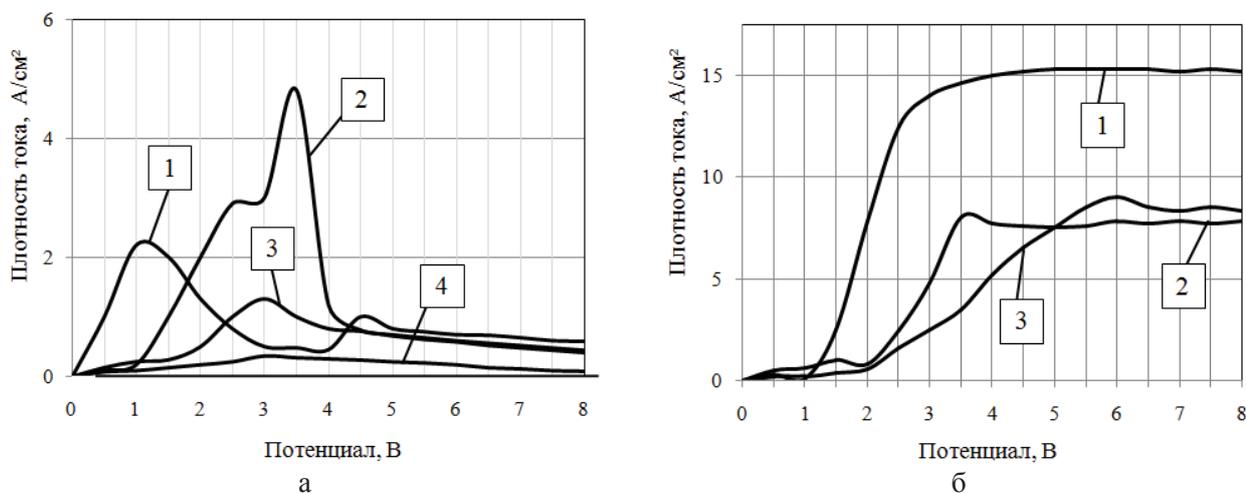
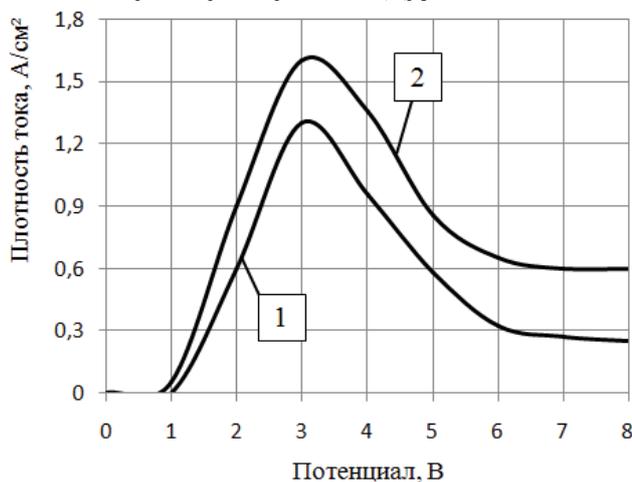


Рис. 1. Потенциодинамические поляризационные кривые анодного растворения в 10 % NaNO₃:
 а – меди М1 (1), твердого сплава ВК8 (2), аморфного сплава 82К3ХСР (3), нанокристаллического сплава 5БДСР (4); б – стали 110Г13Л (1), стали Р9К5 (2), стали Р6М5 (3)

Устранение диффузионных ограничений возможно за счет создания необходимых гидродинамических потоков в межэлектродном зазоре, обеспечивая как своевременный вынос из зоны обработки продуктов электрохимического растворения, так и подвод новых порций анионов раствора электролита к обрабатываемой поверхности. Эффективность гидродинамики электролита в межэлектродном зазоре для увеличения скорости анодного растворения подтверждается данными работ [15 – 17] и иллюстрируется результатами экспериментов с использованием метода вращающегося дискового электрода (рис. 2).

Известно, что скорость электрохимического растворения материала определяется как режимными параметрами процесса и в первую очередь, значением технологического напряжения и величиной межэлектродного зазора, так и выбором состава электролита для обработки конкретного материала, а именно, его удельной электропроводностью, анионным составом и концентрацией раствора [18]. Практика электрохимической размерной обработки подтвердила эффективность использования в качестве электролита водных растворов нейтральных солей – хлорида натрия (калия), азотнокислого натрия (калия), сернокислого натрия (калия).

Если диффузионные ограничения, как было показано возможно устранить посредством создания гидродинамических потоков в межэлектродном зазоре, то образованию различного рода окисных пленок, являющихся причиной появления пассивационных ограничений в обработке и зависящих от природы химических реакций определенного материала в конкретном электролите, организация гидродинамических потоков в зоне обработки препятствовать не может. Для решения данной проблемы в повышении скорости анодного растворения необходимо использовать иные механизмы активации электрохимической обработки. В исследованиях [19 – 22] подробно рассмотрены возможные механизмы активации процесса – анодного растворения. Часть из них – тепловой, гидродинамический, ответственные за инициирование анионной активности электролита и за снятие диффузионных ограничений, реализуется в рамках самой электрохимической обработки за счет изменения режимных параметров процесса. Другие механизмы направленные на устранение или снижение пас-



*Рис. 2. Потенциодинамические поляризационные кривые анодного растворения аморфного сплава 82К3ХСР в 10 % NaNO₃:
1 – в стационарных условиях;
2 – в условиях вращающегося дискового электрода ($\sqrt{\omega} = 15,19c^{-1/2}$)*

сивационных ограничений предполагают задействование иных процессов, не присущих собственно электрохимической обработке.

Комбинирование различных процессов в одной обработке по существу означает появление нового технологического способа, направленного на достижение показателей в обработке, которые нельзя реализовать, используя комбинируемые процессы по отдельности. Так для снятия пассивационных ограничений в электрохимической обработке необходимо постоянное обновление анодной поверхности. Самым простым способом депассивации в этом случае является механическое удаление продуктов электрохимических реакций с поверхности анода. Эффективность электрохимического растворения анодной поверхности в условиях ее постоянного обновления подтверждают результаты потенциостатических исследований, когда в первоначальный момент обработки токи включения во всем исследуемом диапазоне потенциалов значительно превышают токи в условиях пассивационных ограничений (рис. 3).

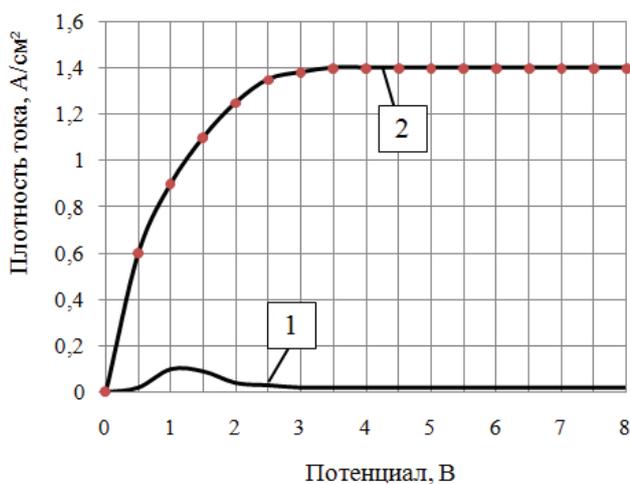


Рис. 3. Потенциодинамические (1) и потенциостатические (2) поляризационные кривые анодного растворения меди М1 в 5 % КСl: 1 – при наличии пассивационных ограничений; 2 – в условиях механической депассивации анодной поверхности

Практическая реализация комбинирования рассмотренных процессов заложена в схеме электроалмазного шлифования [23 – 42] с использованием алмазных кругов на металлической связке, когда при электрохимическом растворении обрабатываемого материала катодом является металлическая связка шлифовального круга, а постоянная депассивация анодной поверхности осуществляется его алмазными зернами.

Комбинирование электрохимического растворения обрабатываемого материала и механического резания определяет эффективность процесса электроалмазного шлифования – высокую производительность (до 8000 мм³/мин), повышенное качество обрабатываемых поверхностей (отсутствие дефектов в виде прижогов, микротрещин). На рис. 4 представлены изделия, полученные с использованием электроалмазного шлифования как метода формообразования исполнительных поверхностей.

На рис. 5 показан разработанный полуавтомат для электроалмазного шлифования пазов в железе статора электрической машины.

Весьма перспективным представляется комбинированный способ обработки металлов и сплавов [43], разработанный на кафедре технологии машиностроения НГТУ, основанный на сочетании электрохимической размерной обработки и лазерного воздействия различных длин волн излучения. На рис 6 показана схема установки и ее внешний вид.

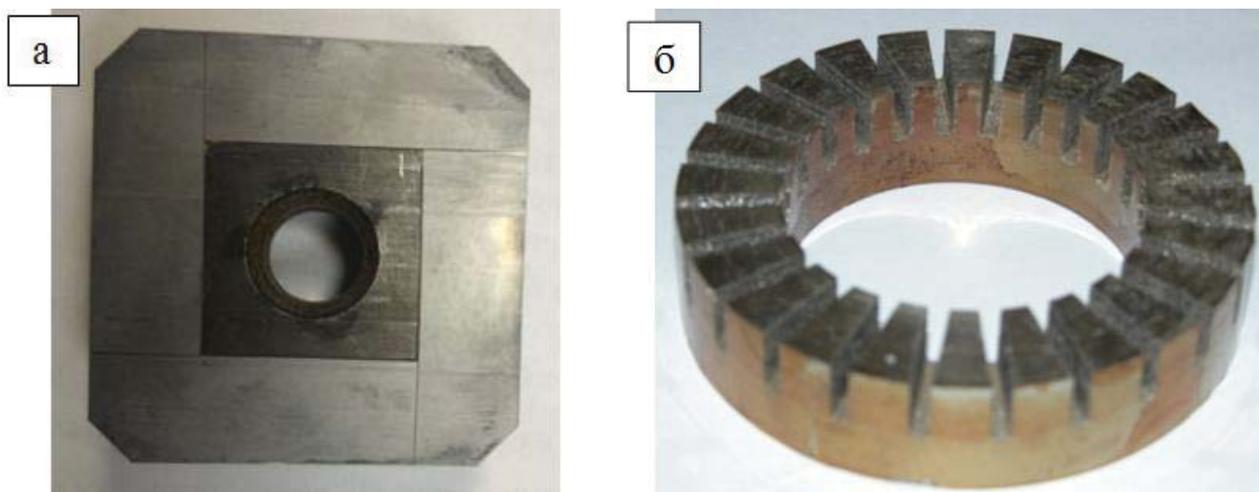


Рис. 4. Твердосплавные резцы (а) и изделие из нанокристаллического сплава (б), обработанные с использованием электроалмазного шлифования

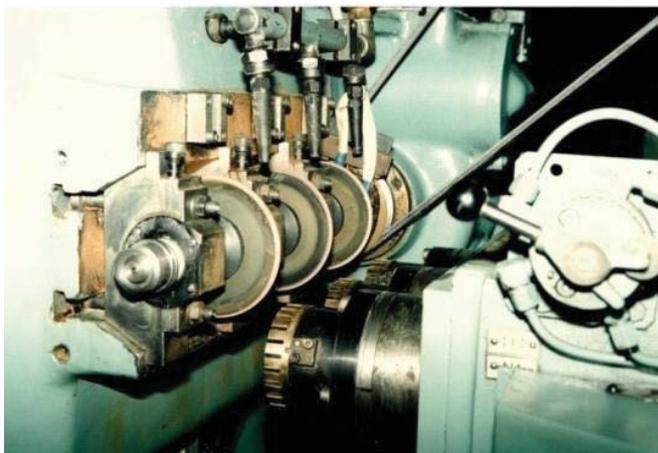


Рис. 5. Полуавтомат для электроалмазного шлифования пазов в железе статора электрической машины

Многочисленные исследования [20, 22, 44 – 64] подтверждают значительные перспективы использования лазерной интенсификации электрохимических процессов обработки значительного круга труднообрабатываемых металлов и сплавов. В отличие от электроалмазного шлифования, в котором процессу механического резания отводится роль только инструмента депассивации поверхности, в методе лазерно – электрохимической обработки задействованы несколько механизмов активации процесса анодного растворения – тепловая активация, воздействия светогидравлического эффекта, влияние на пассивационные

процессы, фотоактивация химических и электрохимических реакций. Реализация того или иного механизма либо их совокупности определяется как спектральными характеристиками лазерного излучения, так и его режимными параметрами – плотностью мощности и частотой следования импульсов. На рис. 7 представлены потенциодинамические кривые анодного растворения ряда труднообрабатываемых материалов – нержавеющей стали 12Х18Н9Т, твердого сплава ВК8, титанового сплава ОТ – 4 в 10 % растворе электролита NaNO_3 . Если растворение нержавеющей стали во всем исследованном диапазоне потенциалов происходит в активном состоянии, то при обработке твердого сплава при потенциалах свыше 2,5 В наблюдается участок пассивации, характеризующийся падением плотности тока с ростом потенциала. Для титанового сплава электрохимическое растворение практически отсутствует, что объясняется интенсивной пассивацией анодной поверхности на начальной стадии процесса.

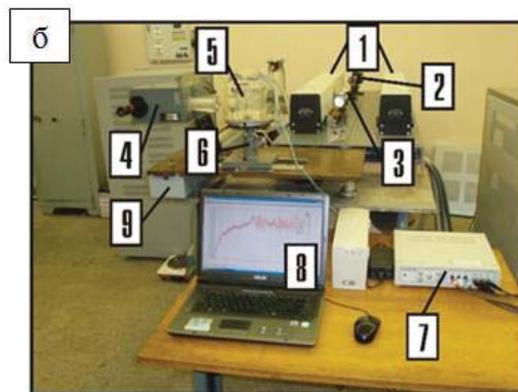
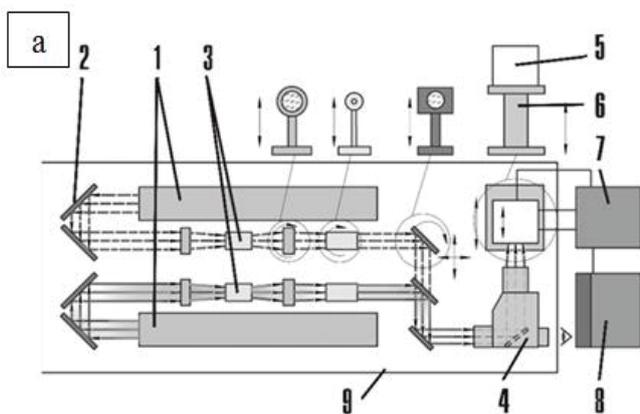


Рис. 6. Схема установки (а) и ее внешний вид (б)
для лазерно – электрохимической обработки металлов и сплавов

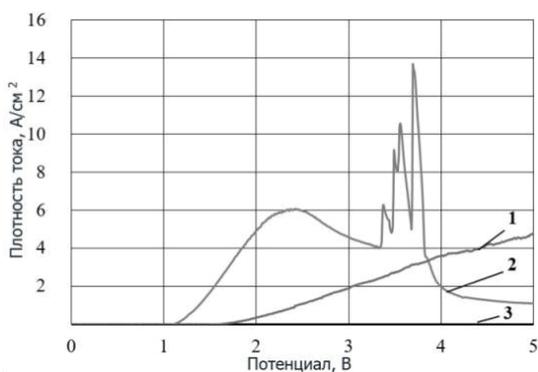


Рис. 7. Потенциодинамические поляризационные кривые анодного растворения в 10 % NaNO_3 :

1 – нержавеющая сталь 12X18H9T; 2 – твердый сплав BK8; 3 – титановый сплав ОТ – 4

позволяет выявить наиболее эффективный для конкретного материала.

Весьма существенная активация электрохимического растворения наблюдается при обработке нержавеющей стали (рис. 8, а). Во всем диапазоне потенциалов наблюдается непрерывный рост плотности тока. При интенсификации электрохимической обработки твердого сплава также отмечается увеличение плотности тока, но меньшей интенсивности (рис. 8, б). Введение лазерного излучения в зону обработки титанового сплава позволило инициировать электрохимическое растворение данного материала во всем диапазоне потенциалов, хотя и с невысоким значением плотности тока (рис. 8, в). Возможность реализации нескольких механизмов активации процесса анодного растворения при лазерно – электрохимической обработке

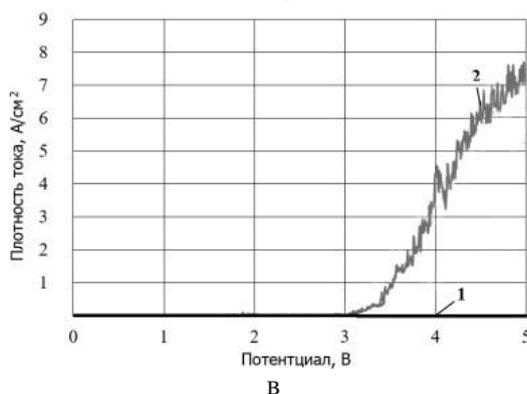
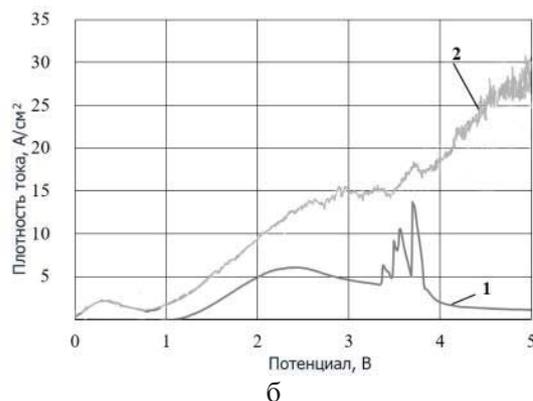
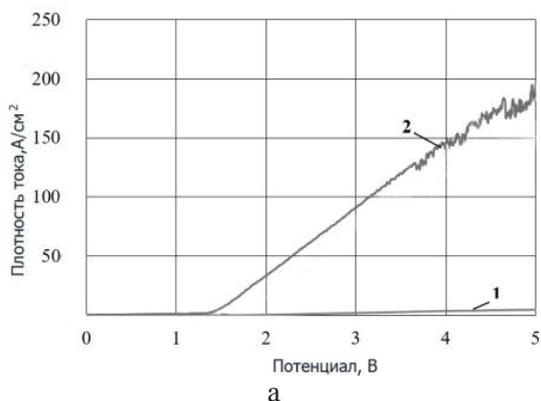


Рис. 8. Потенциодинамические поляризационные кривые анодного растворения нержавеющей стали 12X18H9T (а), твердого сплава BK8 (б), титанового сплава ОТ – 4 (в) в 10 % NaNO_3 :

1 – в условиях электрохимического процесса; 2 – при лазерной активации излучением с длиной волны 1,06 мкм, плотностью мощности $1,05 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$, частотой следования импульсов 10 кГц

Рассмотренные выше схемы введения определенных процессов в электрохимическую обработку ориентированных на снятие имеющихся место ограничений либо интенсификацию определенных стадий анодного растворения. Возможны комбинационные схемы, когда сочетаемые процессы играют независимую роль в достигаемых результатах обработки. К ним следует отнести эрозионно – электрохимическую обработку металлов и сплавов, когда в межэлектродном промежутке реализуются два процесса – электрохимическое растворение обрабатываемого материала и его плавление и удаление за счет энергии эрозионных разрядов. В исследованиях [65] показано, что введение высоковольтных импульсов амплитудой 300 – 400 В, длительностью до 4 мкс и частотой 40 кГц в процесс электрохимической обработки отверстия в меди позволило увеличить скорость прошивки до 10 раз даже в условиях обработки неподвижным катодом – инструментом. Привлекательным в данной схеме является простота ее реализации, поскольку поставщиком газообразных продуктов, необходимых для осуществления различных процессов, является электрохимическая стадия обработки.

Список литературы

1. Рахимьянов Х. М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н. Размерная обработка деталей с покрытиями из наноструктурированных порошковых материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2010. - № 4. – С. 22 – 26.
2. Рахимьянов Х. М., Янпольский В.В. Анодное растворение быстрорежущей стали Р6М5 и ее составляющих в водных растворах // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2003. - № 4. – С. 141 – 147.
3. Рахимьянов Х. М., Красильников Б.А., Янпольский В.В., Никитенко, М.И., Моисеенко А.Н. Электрохимическое растворение покрытий из порошковых материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2011. - № 2. – С. 3 – 5.
4. Рахимьянов Х. М., Красильников Б.А., Янпольский В.В., Красильников Д.Б. Электрохимическая обработка безвольфрамовых твердых сплавов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2010. - № 3. – С. 3 – 7.
5. Рахимьянов Х. М., Красильников Б.А., Янпольский В.В., Марфелев А.А., Конев А.Ю. Электрохимическое растворение стали 110Г13Л // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2012. - № 3. – С. 40 – 41.
6. Рахимьянов Х. М., Красильников Б.А., Рахимьянов К.Х., Гаар Н.П. Исследования анодного поведения стали 12Х18Н9Т в водных растворах хлорида и нитрата натрия / В сборнике: Современная электротехнология в машиностроении // Международная научно – техническая конференция: сборник трудов. 2007. – С. 150 – 159.
7. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И. Степень локализации процесса при интенсификации анодного растворения меди // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2015. - № 3 (68). – С. 58 – 65.
8. Рахимьянов Х.М., Василевская С.И. Технологические возможности электрохимической обработки отверстий неподвижным катодом – инструментом // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. - № 2 (71). – С. 12 – 20.
9. Рахимьянов Х. М., Красильников Б.А., Рахимьянов К.Х. Анодное растворение аморфных сплавов / В сборнике: Современные электрохимические технологии в машиностроении материалы IV международного научно – практического семинара. 2003. – С. 35 – 37.
10. Рахимьянов Х. М., Янпольский В.В., Иванова М.В. Электрохимическое растворение быстрорежущей стали Р12Ф3К10М2 / В сборнике: Инновации в машиностроении (ИнМаш – 2015) // Сборник трудов VII Международной научно – практической конференции. Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Новосибирский государственный технический университет, Бийский техноло-

- гический институт, МИП Техмаш; Под редакцией Блюменштейна В.Ю. Баканова А.А. Останина О.А., 2015. – С. 386 – 389.
11. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Юсупов А.С. Струйная электрохимическая обработка стали 110Г13Л // Системы. Методы. Технологии. 2016. - №2 (30). – С. 34 – 38
 12. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Дураков В.Г., Кадырбаев Р.М., Хасанов Д.В. Особенности электрохимического растворения покрытия на основе стали Р6М5 с добавлением 35 % ТiС в водных растворах нейтральных солей // Системы. Методы. Технологии. 2016. - №3. – С. 53 – 57.
 13. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Иванова М.В., Проскурин Р.С. Электрохимическое растворение быстрорежущей стали Р9К5 в водных растворах нейтральных солей // Механики XXI века. 2016. - № 15. – С. 67 – 69.
 14. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Кадырбаев Р.М., Хасанов Д.В. Особенности электрохимического растворения покрытия на основе стали Р6М5 с добавлением ТiС // Механики XXI века. 2016. - № 15. – С. 92 – 95.
 15. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Захаров А.С., Василевская С.И. Влияние гидродинамического режима на скорость анодного растворения меди в пассивирующих электролитах // Механики XXI века. 2015. - № 14. – С. 112 – 115.
 16. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В. Влияние диффузионных ограничений на процесс анодного растворения стали Р6М5 при электроалмазном шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2006. - № 2. – С. 31 – 32.
 17. Рахимьянов Х.М., Гаар Н.П. Исследование процесса анодного растворения нержавеющей стали 12Х18Н9Т методом вращающегося дискового электрода // В сборнике: Инновации в машиностроении – 2010 материалы I Международной научно – практической конференции. Федеральное агентство по образованию, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова и др.. 2010. – С. 82 – 84.
 18. Рахимьянов Х.М., Василевская С.И. Выбор электролитов для электрохимической обработки отверстий малого диаметра в меди. // Научные технологии в машиностроении. 2017. - № 4(70). – С. 17 – 24. – doi: 10.12737/article_58ef80901e6c46.92255316.
 19. Рахимьянов Х.М. Красильников Б.А., Василевская С.И. Исследование анодного поведения меди в условиях электрохимической обработки при гидроструйной активации поверхности / В сборнике: Инновации в машиностроении (ИнМаш – 2015) // Сборник трудов VII Международной научно – практической конференции. Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Новосибирский государственный технический университет, Бийский технологический институт, МИП Техмаш; Под редакцией Блюменштейна В.Ю. Баканова А.А. Останина О.А., 2015. – С. 126 – 130.
 20. Гаар Н.П., Рахимьянов Х.М. Пути интенсификации электрохимической размерной обработки / Ползуновский альманах. 2008. № 4. – С. 191 – 192.
 21. Рахимьянов Х.М., Рахимьянов К.Х., Гаар Н.П. Оценка механизмов активации процесса электрохимической размерной обработки нержавеющей стали // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2010. - № 3. – С. 19 – 21.
 22. Rakhimyanov H.M., Gaar N.P. Possible ways for intensification of dimensional electrochemical machining (DECM) // в сборнике: Proceedings of IFOST – 2008 – 3rd International Forum on Strategic Technologies 3rd International Forum on Strategic Technologies, IFOST – 2008. Novosibirsk – Tomsk, 2008. – С. 106 – 107.
 23. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н. Электроалмазная обработка напыленных износостойких покрытий // В сборнике: Инженерия поверхностного слоя деталей машин труды Международной научно – практической конференции. Министерство образования и науки Российской Федерации, Кузбасский государственный технический университет, Белорусский национальный технический университет, Под редакцией В.Ю. Блюменштейна, Ф.И. Пантелеенко. 2009. – С. 365 – 368.

24. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимьянов К.Х. Точность формообразования при электроалмазной прорезке пазов в аморфных и нанокристаллических сплавах // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2006. - № 2. – С. 32 – 33.
25. Рахимьянов Х.М., Рахимьянов К.Х., Гаар Н.П. Активация анодного растворения аморфных и нанокристаллических сплавов непрерывным обновлением поверхности // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2010. - № 1. – С. 35 – 38.
26. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимьянов К.Х., Еремина А.С. Модернизация оборудования для электроалмазного шлифования изделий из аморфных и нанокристаллических сплавов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2012. - № 3. – С. 37 – 39.
27. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В., Козич Т.В. Особенности электроалмазного шлифования деталей с покрытием на основе порошкового материала ПС12НВК // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2013. - № 3 (60). – С. 36 – 40.
28. Рахимьянов Х.М., Рахимьянов К.Х. Влияние режимов обработки на производительность электроалмазного шлифования нанокристаллических и аморфных сплавов // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. 2010. - № 1. – С. 99 – 100.
29. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В. Повышение производительности процесса электроалмазного шлифования быстрорежущих сталей // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2006. - № 4. – С. 7 – 8.
30. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В. Определение режимов обработки быстрорежущей стали Р6М5 при глубинном электроалмазном шлифовании // *Сварка в Сибири*. 2005. № 1. – С. 49 – 50.
31. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Никитенко М.И., Богаев А.А. Исследование производительности электроалмазной обработки жаропрочного сплава ЖС6 и твердого сплава ВК8 // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2007. - № 3. – С. 8 – 10.
32. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимьянов К.Х., Никитенко М.И. Электроалмазное шлифование твердого сплава ВК8 // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2010. - № 3. – С. 9 – 13.
33. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В. Применение асимметричных биполярных импульсов при электроалмазном шлифовании быстрорежущей стали Р6М5 // В сборнике: *Современные проблемы в технологии машиностроения Всероссийская научно – практическая конференция, посвященная 100 – летию со дня рождения профессора Муханова Ивана Ивановича*. Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Новосибирский государственный технический университет. 2009. – С. 154 – 157.
34. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н. Электроалмазное шлифование покрытий группы ВК // В сборнике: *Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе материалы 9 – й Всероссийской научно – практической конференции*. 2011. – С. 80 – 82.
35. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В., Никитенко М.И., Моисеенко А.Н. Особенности анодного растворения износостойкого покрытия на основе порошка ВК25 при электроалмазном шлифовании // В сборнике: *Инновации в машиностроении Сборник трудов 2 – ой Международной научно – практической конференции*. Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. 2011. – С. 411 – 416.
36. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимьянов К.Х. Технологические особенности обработки изделий, выполненных из аморфных и нанокристаллических сплавов / В сборнике: *Инновации в машиностроении (ИнМаш – 2015) // Сборник трудов VII Международной научно – практической конференции*. Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Новосибирский государственный технический университет, Бийский технологический институт, МИП Техмаш; Под редакцией Блюменштейна В.Ю. Баканова А.А. Останина О.А., 2015. – С. 120 – 125.

37. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Василевская С.И. Особенности анодного растворения сплава ЖС6 в условиях электроалмазной обработки / В сборнике: Инновации в машиностроении (ИнМаш – 2015) // Сборник трудов VII Международной научно – практической конференции. Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Новосибирский государственный технический университет, Бийский технологический институт, МИП Техмаш; Под редакцией Блюменштейна В.Ю. Баканова А.А. Останина О.А., 2015. – С. 131 – 135.
38. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н. Электроалмазное шлифование износостойких покрытий на основе порошка ВК25 в условиях минимального припуска // Механики XXI века. 2011. - № 10. – С. 73 – 77.
39. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н. Особенности электроалмазного шлифования износостойких покрытий на основе порошка ВК25 // Механики XXI века. 2010. - № 9. – С. 66 – 69.
40. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В., Козич Т.В., Кадырбаев Р.М. Влияние продольной подачи стола на формирование шероховатости поверхности детали с покрытием при электроалмазном шлифовании // В сборнике: Инновации в машиностроении – основа технологического развития России Материалы VI международной научно – технической конференции. 2014. – С. 109 – 111.
41. Проскурин Р.С. Герасимов Н.В. Рахимьянов Х.М. Электроалмазная обработка специального твердосплавного инструмента // В сборнике: Наука. Технологии. Инновации сборник научных трудов: в 9 частях. 2016. – С. 323 – 325.
42. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В. Технология электроалмазного шлифования с применением ассиметричных биполярных импульсов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2009. - № 4. – С. 27 – 30.
43. Рахимьянов Х.М. Журавлев А.Н., Гаар Н.П., Локтионов А.А. Способ размерной обработки металлов и сплавов // патент на изобретение RUS 2451582 07.07.2010.
44. Рахимьянов Х.М. Журавлев А.Н., Гаар Н.П. Установка для исследования электрохимических процессов в условиях лазерной активации процесса электрохимической размерной обработки // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2010. - № 2. – С. 135 – 144.
45. Рахимьянов Х.М., Гаар Н.П. Математическое моделирование при лазерной термоактивации электрохимической размерной обработке // В сборнике: Современные технологические системы в машиностроении Тезисы докладов. 2006. – С. 45 – 47.
46. Рахимьянов Х.М., Гаар Н.П. Электрохимическая ячейка для исследования интенсификации ЭХРО лазерным излучением // В сборнике: Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса труды I всероссийской научно – технической конференции. 2007. – С. 251 – 254.
47. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Гаар Н.П., Журавлев А.Н., Локтионов А.А. Установка для исследования материалов в условиях лазерно – электрохимической обработки комбинированным излучением // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2012. - № 3. – С. 30 – 32.
48. Рахимьянов Х.М., Рахимьянов К.Х., Гаар Н.П. Оценка механизмов активации процесса электрохимической размерной обработке нержавеющей стали // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2010. - № 3. – С. 19 – 21.
49. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Гаар Н.П., Журавлев А.Н., Локтионов А.А. Методика выбора электролита для лазерно – электрохимической обработки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2012. - № 2. – С. 18 – 21.
50. Рахимьянов Х.М., Гаар Н.П. Интенсификация электрохимической размерной обработки нержавеющей стали лазерным излучением // Механики XXI века. 2008. - № 7. – С. 149 – 152.
51. Рахимьянов Х.М., Рахимьянов К.Х., Журавлев А.Н., Гаар Н.П., Локтионов А.А. Анодное поведение титанового сплава марки ОТ – 4 при интенсификации лазерным излучением процесса электрохимического растворения // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2011. - № 2. – С. 11 – 13.

52. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимьянов К.Х., Журавлев А.Н., Гаар Н.П., Локтионов А.А. Электрохимическая размерная обработка твердого сплава ВК8 в условиях лазерного воздействия // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2011. - № 1. – С. 3 – 7.
53. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Гаар Н.П., Шарапов А.Б. Анодное поведение стали 12Х18Н9Т в водном растворе хлорида натрия при активации процесса электрохимического растворения лазерным излучением // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2010. №2 (60). – С. 123 – 128.
54. Гаар Н.П., Локтионов А.А., Рахимьянов К.Х., Рахимьянов Х.М. Анодное поведение титанового сплава марки ОТ – 4 в водном растворе хлорида натрия при интенсификации лазерным излучением процесса электрохимического растворения // В сборнике: Инновационные технологии в машино – и приборостроении материалы Международной научно – практической конференции. ГОУ ВПО «Омский государственный технический университет», Кафедра «Технология машиностроения», ФГУП «Омское машиностроительное объединение им. П.И.Баранова»; Председатель редколлегии В.В. Шалай. 2010. – С. 47 – 50.
55. Рахимьянов Х.М., Гаар Н.П. Анодное поведение компонентов нержавеющей стали в условиях лазерной интенсификации // В сборнике: Инновации в машиностроении Сборник трудов 2 – ой Международной научно – практической конференции. Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. 2011. – С. 157 – 160.
56. Рахимьянов Х.М., Гаар Н.П. Анодное поведение хрома в водном растворе хлорида натрия при интенсификации лазерным излучением процесса электрохимического растворения // Механики XXI века. 2010. - № 9. – С. 41 – 43.
57. Рахимьянов Х.М., Гаар Н.П. Электрохимическая обработка твердого сплава ВК8 в условиях лазерного воздействия длиной волны 1,06 мкм в хлориде натрия // В сборнике: Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе материалы 9 – й Всероссийской научно – практической конференции. 2011. – С. 77 – 79.
58. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Гаар Н.П., Журавлев А.Н., Локтионов А.А., Мироненко Г.Б. Лазерно – электрохимическая обработка с применением комбинации спектров излучения // Ползуновский альманах. 2012. № 1. – С. 97 – 98.
59. Рахимьянов Х.М., Гаар Н.П., Журавлев А.Н., Локтионов А.А. Особенности активации анодного растворения при лазерно – электрохимической обработке нержавеющей стали 12Х18Н9Т в 10 % водном растворе хлорида натрия // Механики XXI века. 2015. - № 14. – С. 116 – 119.
60. Гаар Н.П., Рахимьянов Х.М. Интенсификация электрохимической размерной обработки нержавеющей стали лазерным излучением // В сборнике: Механики – XXI века сборник докладов VII Всероссийской научно – технической конференции с международным участием. Федеральное агентство по образованию, Министерство образования и науки РФ, Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно – технической сфере, Московский государственный технический университет им Н.Э. Баумана, ГОУ ВПО «Братский государственный университет». 2008. – С. 149 – 152.
61. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Гаар Н.П., Журавлев А.Н., Костюк А.А. Электрохимическое растворение титанового сплава ОТ – 4 в условиях лазерного воздействия // В сборнике: Инновации в машиностроении – основа технологического развития России Материалы VI международной научно – технической конференции. 2014. – С. 86 – 90.
62. Rakhimyanov Kh.M., Gaar N.P. Intensification of anodic dissolution of conductive materials by laser radiation // В книге: Interfinish – seria 2014 international conference on surface engineering for research and industrial applications. 2014. – С. 58.
63. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Гаар Н.П., Локтионов А.А., Василевская С.И. Роль лазерного излучения в интенсификации электрохимического растворения стали 12Х18Н9Т / В сборнике: Инновации в машиностроении (ИнМаш – 2015) // Сборник трудов VII Международной научно – практической конференции. Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Новосибирский госу-

дарственный технический университет, Бийский технологический институт, МИП Техмаш; Под редакцией Блюменштейна В.Ю. Баканова А.А. Останина О.А., 2015. – С. 380 – 385.

64. Рахимьянов Х.М., Гаар Н.П., Локтионов А.А. Особенности активации анодного растворения при лазерно – электрохимической обработке безвольфрамового твердого сплава КНТ – 16 в 10 % - ном водном растворе нитрата натрия // Научные технологии в машиностроении. 2016. № 11 (65) – С. 37 – 43.

65. Рахимьянов Х.М., Леонтьев И.А., Василевская С.И. Технологические перспективы комбинирования электроэрозионных и электрохимических процессов в обработке отверстий малого диаметра // Научные технологии в машиностроении. – 2016. - № 10 (64). – С.7 – 13.

MODERN ELECTROPHYSICAL TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

Rakhimyanov Kh.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: x.raximyanov@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The problems of processing machine parts made of high-strength metals and alloys are considered. The efficiency of using electrophysical processing methods, in particular, electrochemical dimensional processing, is shown. The limitations in achieving high productivity associated with the development of diffusion and passivation phenomena in the processing zone are revealed. It is established that for a significant range of hard-to-process materials, the exclusion of passivation restrictions is possible when combining electrochemical processing with other physical processes, in particular, by mechanical cutting. The prospects of a new method of laser - electrochemical processing, realizing by a complex of mechanisms of intensification of anodic dissolution are shown.

Key words: electrochemical processing, diffusion limitations, passivation processes, electric diamond grinding, laser - electrochemical processing, activation mechanisms.

УДК 006.057

К ВОПРОСУ ПЕРЕХОДА РОССИИ НА НОВЫЕ СТАНДАРТЫ ПО РАЗМЕРНОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ

*АСАНОВ В. Б., канд. техн. наук,
ГИЛЕТА В. П., канд. техн. наук,
БЕЗНЕДЕЛЬНЫЙ А. И., канд. техн. наук
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Асанов В.Б. – 630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: asanov@corp.nstu.ru

Аннотация

Проанализированы новые межгосударственные и национальные стандарты России серии "Геометрические характеристики изделий", касающиеся требований к размерной и геометрической точности. Эти стандарты являются модифицированными по отношению к международным стандартам ISO GPS (Geometrical Product Specifications). Выявлены особенности их по сравнению со старыми стандартами, некоторые из которых являются принципиальными. В новых стандартах по другому трактуются предельные размеры по умолчанию. Для предельного размера, соответствующего пределу максимума материала, вместо условия прилегания, введен местный размер, что отражается на технологии изготовления, сборки, измерения и контроля. Важной особенностью является независимость заданий требований по размерной и геометрической точности, позволяющая полнее учитывать функциональные требования к конструктивным элементам. Введены новые термины, определения, символы и обозначения для однозначного интерпретирования требований к размерной и геометрической точности, что особенно важно в условиях цифровых технологий.

Ключевые слова: геометрические характеристики изделий, размерная точность, геометрическая точность, размер, форма, месторасположение, размер максимума и минимума материала, предельные размеры, местный размер, двухточечное измерение, стандарт, независимость.

Введение

Повышение качества продукции и конкурентоспособности в первую очередь зависит от требований, предъявляемых к ней. Технические требования должны быть сформулированы и оформлены правильно и единообразно. Для однозначного истолкования их создаются международные стандарты, обобщающие опыт передовых стран. В области допусков размера, формы, расположения и шероховатости поверхностей за последние годы произошли значительные изменения, касающиеся фундаментальных норм, правил и принципов. Мировое сообщество осваивает новые международные стандарты ISO серии GPS (Geometrical Product Specifications - Геометрические характеристики изделий). Эти стандарты в первую очередь касаются области обработки металлов резанием. Для нормирования размерной и геометрической точности все стандарты этой серии связаны и образуют цепочку стандартов в матричной модели GPS. В ряде стран Европы (Англия, Германия, Польша, Болгария и др.) на сегодняшний день уже введены и вводятся в действие европейские и национальные стандарты,

которые являются идентичными или модифицированными стандартами ISO. В этих странах ведется активная подготовка специалистов, проводятся семинары по изучению особенностей новых стандартов и их использованию при конструировании, производстве, контроле и эксплуатации.

Актуальность перехода на новые международные стандарты для нашей страны очевидна, так как многие стандарты по размерной и геометрической точности уже устарели и требуют пересмотра. Ведутся работы по освоению и введению в действие этих стандартов в странах СНГ и России. Для этого разработаны и разрабатываются межгосударственные и национальные стандарты, которые являются модифицированными (MOD) по отношению к международным. Стандарты серии "Геометрические характеристики изделий" комплексно охватывают вопросы нормирования точности размеров, формы, ориентации, месторасположения и шероховатости поверхностей деталей. Трудности перехода к использованию этих стандартов связаны с освоением новых терминов, определений, обозначений и, главное, с изменениями в подходе к нормированию размерной и геометрической точности.

Авторами проанализированы некоторые новые стандарты по размерной и геометрической точности, внедрение которых является первостепенной задачей. Выявлены особенности этих стандартов по сравнению с ранее используемыми и даны примеры их применения в технической документации. Этот сравнительный анализ позволяет лучше понять принципиальные отличия новых нормативных документов от существующих и ускорить процесс перехода на международные стандарты.

Переход России на новые стандарты связан с большой организационно-технической работой: созданием учебно-методической литературы, подготовкой и переобучением кадров, переработкой конструкторско-технологической документации. Надеемся, что данная статья будет содействовать быстрейшему внедрению стандартов серии GPS в учебную и производственную деятельность.

Классификация стандартов

В международном стандарте ISO 8015:2011 [1] приведена иерархия стандартов серии GPS, которая включает в себя следующие виды стандартов GPS: основные, глобальные, общие и дополнительные. Самый высокий уровень в иерархии занимают основные стандарты GPS, в которых приведены основные концепции, принципы, правила. Стандарты более низких уровней разрабатываются с учетом положений, которые приведены в вышестоящих стандартах.

На рис. 1 показаны номера стандартов ISO, касающиеся размерной и геометрической точности, которые занимают определенные уровни в этой иерархической системе.



Рис.1. Стандарты ISO по размерной и геометрической точности

В соответствии с вышеприведенной иерархией, межгосударственные и национальные стандарты России, касающиеся размерной и геометрической точности и введенные в действие в этот период, можно классифицировать (табл.).

Таблица

Иерархия межгосударственных и национальных стандартов

| Вид стандарта | Номер стандарта | Наименование стандарта | Год введения |
|---------------|-------------------------|---|---|
| Глобальный | ГОСТ 31254-2004 | Геометрические элементы. Общие термины и определения | 2005 |
| Общий | ГОСТ 25346-2013 | Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки | 2015 |
| | ГОСТ 25347-2013 | Система допусков на линейные размеры. Ряды допусков, предельные отклонения отверстий и валов | 2015 |
| | ГОСТ Р 55145-2012 | Назначение размеров и допусков для нежестких деталей | 2014 |
| | ГОСТ Р 53442-2015 | Установление геометрических допусков. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения | 2017 |
| | ГОСТ Р 53090-2008 | Требования максимума материала, минимума материала и взаимодействия | 2011 |
| | ГОСТ Р 53089-2008 | Установление позиционных допусков | 2011 |
| | ГОСТ Р ИСО 4287-2014 | Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности | 2016 |
| | ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 | Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности | 2016 |
| | Дополнительный | ГОСТ 30893.1 | Общие допуски. Предельные отклонения линейных и угловых размеров с неуказанными допусками |
| ГОСТ 30893.2 | | Общие допуски. Допуски формы и расположения, поверхностей, не указанные индивидуально | 2004 |

Отличительные особенности новых стандартов

Новые термины, определения

В стандартах по размерной и геометрической точности используются новые термины и определения: размерный элемент, выявленный и присоединенный элемент, полный и производный элемент, местный размер, размер максимума и минимума материала, интервал допуска, пределы допуска, класс допуска, требования максимума, минимума материала и взаимодействия, размерная и геометрическая точность, допуски ориентации, месторасположения и др.

Для конкретизации технических требований введены новые символы (знаки) такие как, например, \textcircled{E} , \textcircled{M} , \textcircled{L} , \textcircled{F} , $\leftarrow \parallel \boxed{B}$, $\triangleleft \parallel \boxed{B}$, CZ, LD, MD, ACS и др. Для однозначного понимания содержания статьи авторами приведены развернутые определения некоторых терминов из вышеприведенных.

Под **размерной точностью** для линейных размеров (здесь и далее речь будет вестись только о линейных размерах) понимается требование, ограничивающее отклонения размеров.

Геометрическая точность – это требования, ограничивающие отклонения формы, ориентации, месторасположения и биения (раньше эти термины назывались отклонениями формы и расположения).

Для **выявленных** поверхностей **реальных** деталей (путем сканирования по точкам, топографирования, профилографирования и др.) используется термин **местный размер** (этот термин в России впервые был введен в ГОСТ Р 50056 – 92 [2]). По ГОСТ 31254 – 2004 [3] **местный размер** для элемента, образованного двумя параллельными **выявленными плоскостями** – это **расстояние между двумя точками**, расположенными на противоположащих **выявленных** плоскостях. Для цилиндрической поверхности **местный размер выявленного цилиндра (местный диаметр)** – это расстояние между двумя противоположащими точками цилиндра, проходящими через центр **присоединенной окружности** (математически обработанной измерительной информации о выявленной окружности). Местный размер (расстояние) может быть в любом поперечном сечении цилиндра. Для измерения местного размера в соответствии с определением необходима **двухточечная схема**.

На рис. 2 показана выявленная цилиндрическая поверхность вала с местными диаметрами. Необходимо отметить, что местные диаметры проходят через центры присоединенных окружностей, а поперечные сечения перпендикулярны к оси присоединенного цилиндра.

По **умолчанию** присоединенные окружности и присоединенный цилиндр получены аппроксимацией **методом наименьших квадратов (МНК)** выявленного цилиндра [3].

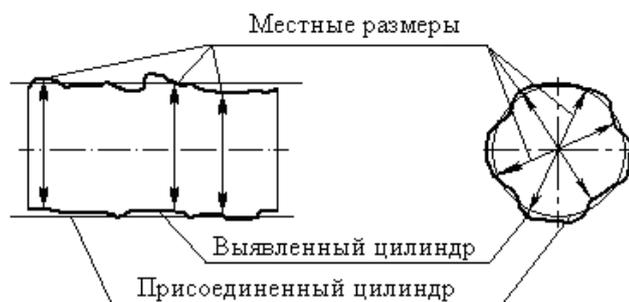


Рис. 2. Местные размеры выявленного цилиндра

Трактовка предельных размеров

Предельные размеры – это два предельно допустимых размера размерного элемента, между которыми должен находиться или которым может быть равен действительный размер (ГОСТ 25346 – 89 [4]). По ГОСТ 25346 – 2013 [5] – это "предельно допустимые размеры размерного элемента", т.е. определение практически не изменилось. Поменялась трактовка предельных размеров, что вносит существенные изменения в их интерпретацию и обозначение. Это в свою очередь требует другого подхода к выбору методов и средств измерений и контроля.

Ранее **предельные размеры** трактовались **по умолчанию** в соответствии с правилом **Тейлора (правилом прилегания)**, которое гласит: размер по сопряжению ограничен пределом максимума материала, а любой местный размер ограничен пределом минимума материала.

Применительно к цилиндрическим поверхностям, например, к валу определение предельных размеров интерпретировалось следующим образом:

- для цилиндрических **наружных** элементов (валов) – диаметр **наименьшего описанного (прилегающего) цилиндра на длине соединения**, не должен быть **больше**, чем предел максимума материала. Дополнительно **наименьший** диаметр в любом месте вала, определенный путем **двухточечного измерения**, не должен быть меньше, чем предел минимума материала.

Истолкование наибольшего предельного размера для наружных поверхностей и наименьшего предельного размера для внутренних поверхностей на предписанной длине по ГОСТ 25346 – 89, по сути дела подпадает под понятие **контур максимума материала** - поверхность или линия, которая имеет номинальную форму и **размер, равный пределу максимума материала** (ГОСТ Р 50056 – 92). Это означает, что для любого размерного элемента с допуском по ИСО, **наличие требования к внешней границе подразумевалось по умолчанию без указания на чертеже, образует этот элемент посадку или нет.**

Такая интерпретация предельных размеров подразумевает **ограничение ими отклонений формы** поверхностей полем допуска размера на предписанной длине. Применительно к цилиндрическим деталям, например, к валу $\varnothing 70h7_{(-0,03)}$, действительное отклонение формы выявленного наружного цилиндра не должно выходить за пределы прилегающего цилиндра с диаметром равным пределу максимума материала, т.е. $d_{\max}=70$ мм.

На рис. 3 показаны различные варианты формы поверхности вала с допустимыми местными размерами, не превышающими предельные. При всех местных размерах равных 70 мм выявленный цилиндр будет иметь идеальную форму (рис. 3, г).

Этим представлениям предельных размеров по умолчанию соответствует принцип конструирования калибров по Тейлору (принцип подобия), когда проходной калибр должен быть полным и проверять контур максимума материала на предписанной длине, а непроходной калибр должен быть неполным (двухточечным) и проверять наименьший допустимый местный размер. Таким образом, такая интерпретация предельных размеров по ГОСТ 26346 – 89, дает возможность контролировать предельными калибрами одновременно все связанные друг с другом размеры и отклонения формы детали и проверять, находятся ли отклонения размеров, формы поверхностей в заданных пределах.

Положения нового стандарта **по умолчанию** изменили эту интерпретацию на правило двухточечного измерения – **любой местный размер** ограничен верхним и нижним предельными размерами, т.е. **размерами максимума и минимума материала**. Это означает, что отклонения формы не учитываются при задании допуска на размер, и, следовательно, мы не можем использовать рабочие проходные калибры для контроля отверстия и вала. Для использования их требуется условие прилегания, которые в новых стандартах реализуются добавлением символа \textcircled{E} в обозначении допуска размера и посадки.

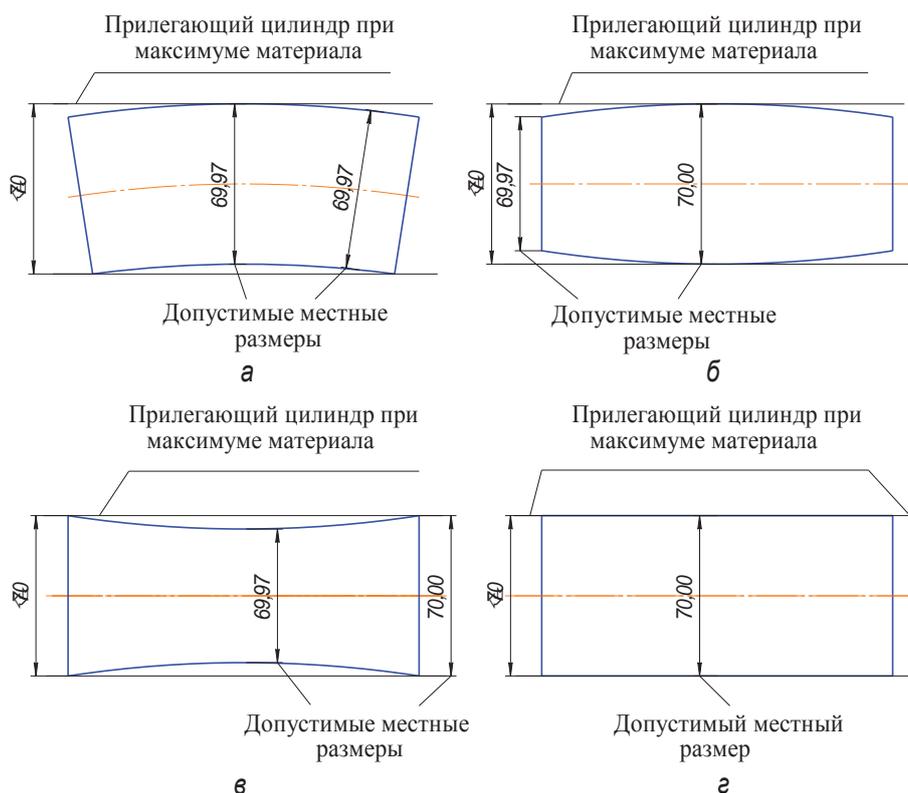


Рис. 3. Различные варианты формы вала

В соответствии с различными представлениями предельных размеров по ГОСТ 25346 – 89 и ГОСТ 26346 – 2013 требования по точности к размеру и посадке обозначаются на чертежах по-разному. На рис. 4 представлены два варианта обозначений по умолчанию **предельными отклонениями и полями допусков** (ГОСТ 25346 – 89) и **предельными отклонениями и классами точности** (ГОСТ 25346 – 2013). Без добавления символа \textcircled{E} требования по новому стандарту не эквивалентны обозначению по старому стандарту. На рис. 5 показаны варианты обозначений требований к точности размеров на деталях и посадки по ГОСТ 26346 – 2013.

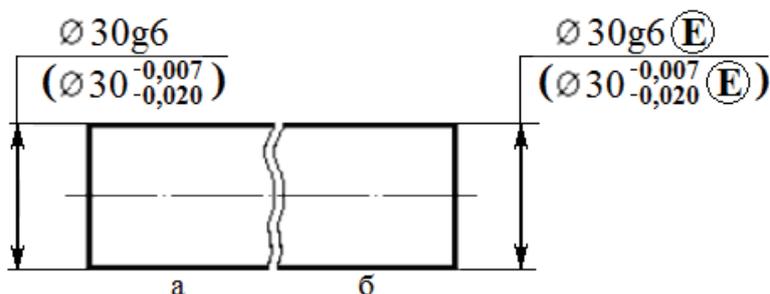


Рис. 4. Эквивалентное обозначение на чертеже требований к точности размера:
а – по ГОСТ 25346 – 89, б – по ГОСТ 25346 – 2013

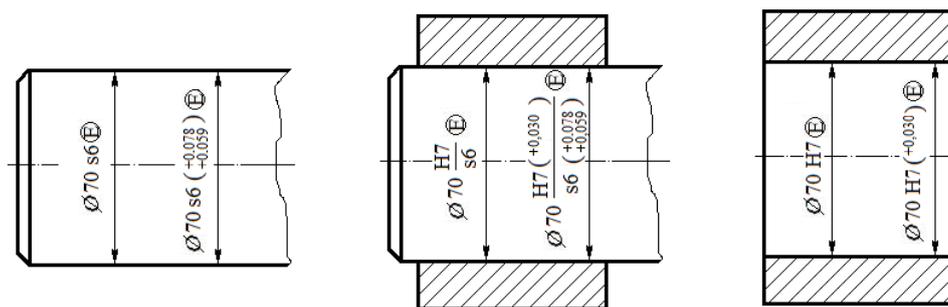


Рис. 5. Примеры обозначений требований к точности размеров и посадки по ГОСТ 25346 – 2013

Примечание. Для посадок с большим натягом, например, посадок, использующих классы допусков u6, u7, требование прилегания не является необходимым.

Принцип независимости

Понятия предельных размеров по новому стандарту тесно перекликаются с принципом независимости. **Принцип независимости** заключается в том, что размерная и геометрическая точность задаются по умолчанию отдельно, если нет никаких других требований*, т.е. задание допусков на размеры должно быть осуществлено без каких либо ссылок на допуски формы, ориентации, месторасположения и биения. При необходимости они должны быть указаны отдельно. Пример, иллюстрирующий принцип независимости задания допусков формы и размера, показан на рис. 6.

* В качестве других требований могут быть, например, требования максимума, минимума материала и взаимодействия или прилегания.

Требования по точности размера и формы к цилиндрической поверхности вала интерпретируются следующим образом. Любой местный диаметр вала, т.е. размер, измеренный по двухточечной схеме, не должен быть больше верхнего предельного размера $\varnothing 70$ мм (размера максимума материала) и меньше нижнего предельного размера $\varnothing 69,97$ мм (размера минимума материала).

Максимальное отклонение от прямолинейности образующей цилиндра допускается до 0,05 мм, а максимальное отклонение от круглости в любом поперечном сечении не должно превышать 0,02 мм независимо от того каким будет местный размер. Все, что было сказано в отношении размера и формы поверхности, касается и ориентации, месторасположения и биения.

Необходимо отметить, что допуск размера жестко привязан к характеризующему им размеру. В противоположность, геометрические допуски позволяют задавать широкий спектр допусков независимо от размеров, в зависимости от функциональных требований к геометрии деталей. Как отмечают авторы [6], один геометрический допуск может относиться к двум или более размерам одновременно. В качестве примера приводится задание позиционного допуска для отверстия, которое "может оказывать влияние на четыре размера: два линейных размера, определяющих расположение оси отверстия на детали, и два угловых размера, определяющих наклон оси".

В предшествующих стандартах по умолчанию отклонения формы не должны были выходить за предельно допустимые размеры в соответствии с условиями прилегания. И если требовалось ужесточить требования по точности формы поверхности, задавались допуски формы меньшие по значению, чем допуск размера. Для нежестких деталей типа колец шарикоподшипников допуск формы мог быть больше допуска размера.

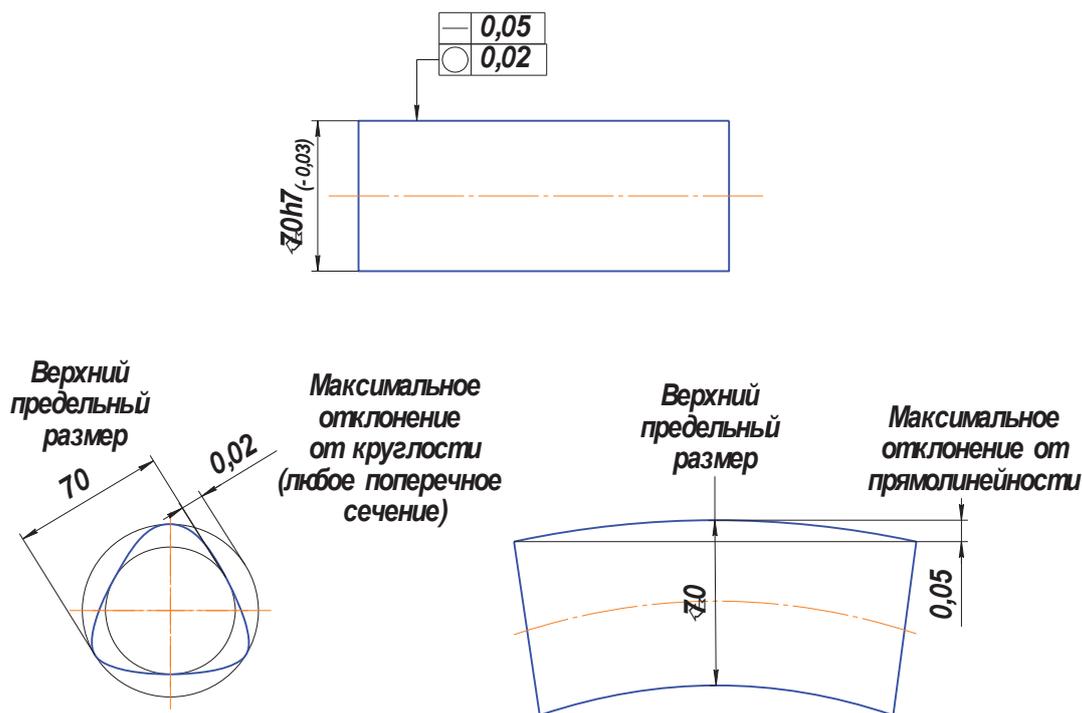


Рис. 6. Независимость задания допуска размера и допуска формы

В некоторых случаях, когда отклонения формы и расположения были важнее, чем отклонения размера, задавались более жесткие требования к форме и расположению поверхностей, например, прямолинейность направляющих станка, плоскостность поверочных плит, но это было скорее исключением, а не правилом. В новых стандартах однозначно четко разделены требования по точности к размеру и геометрической точности.

В статье рассмотрена только часть вопросов по размерной и геометрической точности. Для дальнейшего успешного внедрения новых стандартов необходим анализ вновь введенных понятий, в частности таких, как требования максимума, минимума материала и взаимодействия для выявления особенностей их по сравнению с зависимыми и независимыми допусками формы и расположения поверхностей. Требуют отдельного рассмотрения вопросы, связанные с базами по ИСО, с позиционными допусками, с нормированием волнистости и шероховатости поверхности, с особенностями обозначения геометрических допусков в трехмерном пространстве, а также специфику измерения и анализа 3D текстуры поверхности.

В заключении следует сказать, что введение новых стандартов серии "Геометрические характеристики изделий" (GPS), позволит повысить качество и конкурентноспособность продукции, производительность труда, сократить производственно-эксплуатационные затраты, улучшить обмен технической информацией. Эти стандарты учитывают современное и перспективное развитие техники, где широко используются цифровые технологии. Для внедрения новых стандартов требуется проведение большой организационно-технической работы: обучение студентов и переобучение специалистов; выпуск учебно-методической литературы; переработка конструкторско-технологической документации. Выявленные особенности в новых стандартах, надеемся, будут способствовать быстрейшему их освоению и внедрению.

Список литературы

1. ISO 8015:2011. Geometrical Product Specifications (GPS)-Fundamentals-Concepts, principles and rules.
2. ГОСТ Р 50056 – 92 ОНВ. Зависимые допуски формы, расположения и координирующих размеров. Основные положения по применению. - М.: Изд-во стандартов, 1992.
3. ГОСТ 31254 – 2004 (ИСО 14660 – 1: 1999, ИСО 14660 – 2: 1999) ОНВ. Геометрические элементы. Общие термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 2005.
4. ГОСТ 25346 – 89 ОНВ. Единая система допусков и посадок. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений. – М.: Изд-во стандартов, 1992.
5. ГОСТ 25346 – 2013 (ISO 286 – 1:2010) ОНВ. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки. - М.: Изд-во стандартов, 2013.
6. Автоматизация координатных измерений: Учебное пособие / Ю.М. Зубарев, С.В. Косаревский, Н.Н. Ревин. СПб.: Изд-во ПИМаш, 2011. – 160 с.

TO THE QUESTION OF RUSSIA'S TRANSITION TO NEW STANDARDS ON DIMENSIONAL AND GEOMETRIC ACCURACY

Asanov V.B., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e – mail: asanov@corp.nstu.ru

Gileta V.P., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e – mail: v.gileta@corp.nstu.ru

Beznedelnyj A.I., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e – mail: beznedelnyj@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

New interstate and national standards of Russia for the series "Geometric characteristics of products" concerning the requirements for dimensional and geometric accuracy are analyzed. These standards are modified with respect to the international standards of ISO GPS (Geometrical Product Specifications). The features of them are compared with the old ones, some of which are of principle importance. In the new standards, the default limits are treated differently. For the maximum size corresponding to the maximum material limit, instead of the fit condition, a local size is introduced, which affects the manufacturing, assembly, measurement and control technology. An important feature is the independence of requirements for dimensional and geometric accuracy, which allows for more fully taking account of the functional requirements for structural elements. New terms, definitions, symbols and symbols and designations have been introduced to unambiguously interpret the requirements for dimensional and geometric accuracy, which is especially important in the conditions of digital technologies.

Keywords: geometric characteristics of products, dimensional accuracy, geometric accuracy, size, shape, location, size of maximum and minimum material, limiting dimensions, local size, two-point measurement, standard, independence.

УДК 378.14

О ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ БАКАЛАВРА МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ НОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ

*СМИРНОВ В. В., канд. техн. наук, доцент,
ОВЧАРЕНКО А. Г., доктор техн. наук, профессор,
ФИРСОВ А. М., канд. техн. наук, доцент
(БТИ АлтГТУ, г. Бийск, Россия)*

Смирнов В.В. – 659305, Сибирский федеральный округ,
Алтайский край, г. Бийск, улица имени Героя Советского Союза Трофимова, 27,
Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,
е – mail: v2s0@yandex.ru

Аннотация

В статье рассматриваются подходы к решению проблемы формирования основной профессиональной образовательной программы бакалавриата в области машиностроения на основе требований новых образовательных стандартов. Образовательная программа формируется методом нисходящего проектирования. Задачи профессиональной деятельности формулируются на основе требований профессиональных стандартов. Разработано содержание профессиональных компетенций с учётом формулировок трудовых функций, взятых из профессиональных стандартов. Нисходящее проектирование учебного плана осуществляется в направлении от заданных компетенций к перечню дисциплин.

Ключевые слова: бакалавр машиностроения, основная образовательная программа, профессиональные стандарты.

Введение

Согласно современному подходу к формированию целей и результатов высшего профессионального образования, компетенции, приобретаемые учащимся за время обучения, характеризуют его способность и готовность решать определенные профессиональные задачи [1]. В проектах образовательных стандартов ФГОС ВО 3++ для области образования «Инженерное дело, технологии и технические науки» представлены три группы компетенций бакалавра: универсальные, общепрофессиональные и профессиональные. При этом формулировки универсальных и общепрофессиональных компетенций приводятся в образовательных стандартах, а перечень профессиональных компетенций вуз устанавливает самостоятельно с учетом направленности (профиля) образовательной программы. При разработке образовательной программы и учебного плана по установленному профилю подготовки образовательная организация должна ориентироваться на знания и умения, необходимые для выполнения трудовых функций и заданные в соответствующих профессиональных стандартах. Вузу предоставляется свобода выбора профессиональных стандартов с учётом потребностей экономики региона.

Системный подход предполагает, что проектирование объекта, в том числе основной профессиональной образовательной программы (ОПОП), может выполняться в восходящем или нисходя-

щем направлении [2]. При восходящем проектировании учебный план формируется на основе ранее читаемых учебных дисциплин, на базе имеющегося материально-технического и кадрового обеспечения. Нисходящее проектирование позволяет на основе заданных компетенций составить перечень учебных дисциплин. Содержание дисциплин разрабатывается в соответствии задачами формирования универсальных и общепрофессиональных компетенций, а также в соответствии с требованиями к знаниям и умениям, необходимым для выполнения трудовых функций, определённых профильными профессиональными стандартами. Нисходящее проектирование более рационально с точки зрения целей и задач профессионального образования. Вместе с тем чрезмерное стремление разработчиков учебных планов удовлетворить узкопрофессиональным характеристикам образовательной модели способно лишить инженерное образование фундаментальности, что в условиях современного быстро меняющегося мира может негативно отражаться на возможностях выпускника программы бакалавриата, связанных с дальнейшим профессиональным и личностным ростом.

Описание теоретических исследований

С учётом кадровых потребностей базовых предприятий и региональной промышленности в Бийском технологическом институте (филиале) АлтГТУ им. И.И. Ползунова определён и утверждён один из наиболее универсальных профилей подготовки бакалавра по направлению 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств. Этот профиль – технология машиностроения – соответствует основному виду производственной деятельности выпускников, связанному с технологической подготовкой машиностроительного производства. Для формирования содержательной линии ОПОП были выбраны профессиональные стандарты, снабжённые соответствующими требованиями к уровню образования и квалификации, и сформулированы задачи профессиональной деятельности (см. табл.1).

Таблица 1

| Профессиональный стандарт | Задачи профессиональной деятельности |
|---|---|
| 40.031 Специалист по технологиям материало-обработывающего производства | Технологическая подготовка и обеспечение производства изделий машиностроения |
| 40.100 Специалист по инструментальному обеспечению машиностроительного производства | Инструментальное обеспечение механосборочного участка |
| 40.052 Специалист по проектированию оснастки и специального инструмента производства | Разработка технологической оснастки и специального инструмента |
| 40.090 Специалист по контролю качества механосборочного производства | Контроль качества заготовок и изделий в механосборочном производстве |
| 40.069 Специалист по наладке и испытаниям технологического оборудования механосборочного производства | Пусконаладочные работы и испытания технологического оборудования механосборочного производства |
| 40.081 Специалист по анализу и диагностике технологических комплексов механосборочного производства | Анализ и диагностика технологических комплексов механосборочного производства |
| 28.003 Специалист по автоматизации и механизации технологических процессов механосборочных производств | Сбор исходных данных, разработка технической документации, сопровождение изготовления и эксплуатации средств и систем автоматизации и механизации |
| 40.083 Специалист по компьютерному проектированию технологических процессов | Компьютерное проектирование технологических процессов |
| 40.013 Специалист по разработке технологий и программ для оборудования с числовым программным управлением | Разработка технологий и программ изготовления деталей на оборудовании с ЧПУ |
| 40.089 Специалист по компьютерному программированию станков с числовым программным управлением | Компьютерное программирование станков с числовым программным управлением |

Профессиональные компетенции бакалавра по профилю «технология машиностроения» сформулированы на основе обобщенных трудовых функций и трудовых функций; они представлены в табл. 2.

Таблица 2

| Содержание компетенции | Соответствующие трудовые функции из профессиональных стандартов |
|---|--|
| 1 | 2 |
| ПК-1. Способность осуществлять технологическую подготовку и обеспечение производства изделий машиностроения низкой и средней сложности. | Обеспечения технологичности изделия низкой и средней сложности. Выбор заготовок для производства деталей низкой и средней сложности. Разработка технологических процессов изделий машиностроения низкой и средней сложности. Контроль и управление технологическими процессами изготовления изделий машиностроения низкой и средней сложности. |
| ПК-2. Способность решать простые задачи инструментального обеспечения механосборочного участка. | Определение потребности производственного участка в инструментах и инструментальных приспособлениях. Технический надзор за эксплуатацией инструментов и инструментальных приспособлений. Подготовка данных для разработки заявок на проектирование, изготовление и приобретение инструментов и инструментальных приспособлений. Организация инструментальнообслуживания рабочих мест. |
| ПК-3. Способность разрабатывать типовые и простые конструкции технологической оснастки и специального инструмента | Выпуск конструкторской и другой технической документации, внесение изменений в конструкторскую документацию. Разработка типовых и простых конструкций технологической оснастки и специального инструмента, выполнение технических расчетов и расчетов экономической эффективности в соответствии с типовыми методиками. Согласование технических заданий на разработку типовых и простых конструкций технологической оснастки и специального инструмента |
| ПК-4. Способность осуществлять контроль качества заготовок и изделий в механосборочном производстве | Контроль качества поступающих материалов, заготовок и комплектующих изделий. Контроль качества и испытания изготавливаемых изделий машиностроения низкой и средней сложности. Контроль соблюдения технологической дисциплины. Выявление причин брака в производстве изделий машиностроения низкой и средней сложности и разработка рекомендаций по его устранению |
| ПК-5. Способность выполнять пусконаладочные работы и испытания технологического оборудования механосборочного производства низкой сложности | Выполнение пусконаладочных работ нового технологического оборудования низкой сложности. Наладка технологического оборудования низкой сложности для изготовления определенной группы изделий. Обработка тест – изделия на технологическом оборудовании низкой сложности. Выполнение проверок заявленных характеристик технологического оборудования низкой сложности. |
| ПК-6. Способность выполнять анализ и диагностику технологического комплекса уровня участка/линии | Анализ состава, количества механосборочного и подъемно-транспортного оборудования производственного участка/линии. Анализ размещения механосборочного и подъемно-транспортного оборудования на участке/линии. Определение параметров технологического комплекса уровня производственного участка/линии. |

Продолжение Таблицы 2

| 1 | 2 |
|---|--|
| ПК-7. Способность выполнять сбор исходных данных, разработку технической документации, сопровождение изготовления и эксплуатации средств и систем автоматизации и механизации | Сбор исходных данных для проведения проектных, исследовательских и опытно-конструкторских работ, на изготовление и ремонт средств автоматизации и механизации, разработка технической документации. Сопровождение изготовления, монтажа, наладки, участие в испытаниях и сдаче в эксплуатацию, сопровождение эксплуатации средств и систем автоматизации и механизации. |
| ПК-8. Способность выполнять компьютерное проектирование технологических процессов изготовления типовых, унифицированных и стандартизованных изделий | Создание новых и изменение существующих форм технологических документов. Составление справочников средств технологического оснащения, конструкторско-технологических решений, нормативно-методической документации. Администрирование систем автоматизированного проектирования технологических процессов. Компьютерная разработка комплектов технологических документов на технологические процессы изготовления типовых, унифицированных и стандартизованных изделий с использованием формализованных алгоритмов. Внесение изменений в комплекты технологических документов на технологические процессы изготовления типовых, унифицированных и стандартизованных изделий. |
| ПК-9. Способность выполнять компьютерное проектирование типовых, групповых и единичных технологических процессов | Компьютерная разработка комплектов технологических документов на технологические процессы изготовления типовых, унифицированных и стандартизованных изделий. Внесение изменений в комплекты технологических документов на типовые, групповые и единичные технологические процессы. Отработка конструкции изделий на технологичность. Группирование изделий по технологическим и конструктивно-технологическим признакам. Разработка и оформление технических заданий на изготовление или приобретение технологической оснастки. Компьютерная разработка комплектов технологических документов на типовые, групповые и единичные технологические процессы. Проведение работ по унификации и типизации конструкторско-технологических решений. Освоение и внедрение типовых, групповых и единичных технологических процессов. Выявление и решение проблем технологии. Осуществление методического и административного руководства работой группы технологов. |
| ПК-10. Способность разрабатывать технологии и программы изготовления простых деталей типа тел вращения и простых корпусных деталей на оборудовании с ЧПУ | Разработка технологий изготовления простых деталей типа тел вращения на оборудовании с ЧПУ. Разработка программ изготовления простых деталей типа тел вращения на оборудовании с ЧПУ. Отладка на станке с ЧПУ управляющих программ изготовления простых деталей типа тел вращения. Разработка технологий изготовления простых корпусных деталей на оборудовании с ЧПУ. Разработка программ изготовления простых корпусных деталей на оборудовании с ЧПУ. Отладка на станке с ЧПУ управляющих программ изготовления простой корпусной детали. |

| 1 | 2 |
|--|---|
| ПК-11. Способность выполнять компьютерное программирование станков с числовым программным управлением 2- и 3-координатной обработки лезвийным инструментом | <p>Разработка плана выполнения операции на станке с числовым программным управлением 2- и 3-координатной обработки лезвийным инструментом.</p> <p>Разработка управляющей программы и программирование станка с числовым программным управлением 2- и 3-координатной обработки лезвийным инструментом.</p> <p>Отладка управляющей программы станка с числовым программным управлением 2- и 3-координатной обработки лезвийным инструментом</p> |

На основе анализа содержания профессиональных компетенций, а также необходимых знаний и умений, перечисленных в профессиональных стандартах, на верхнем иерархическом уровне определен состав блоков дисциплин, обеспечивающих поддержку профессиональной деятельности в области технологической подготовки машиностроительного производства. К таким дисциплинам относятся: технология машиностроения; проектирование машиностроительного производства; режущий инструмент; технологическая оснастка; оборудование машиностроительных производств; автоматизация производственных процессов; САПР технологических процессов; программирование станков с ЧПУ; надёжность и диагностика технологических систем; материаловедение; метрология, стандартизация и сертификация; нормирование точности и технический контроль; инструментальное оснащение оборудования с ЧПУ и ОЦ; аппаратные и программные средства систем управления.

Результаты и обсуждение

Дисциплины, реализующие профессиональные компетенции, обеспечивают решение задач производственно-технологической деятельности и должны определять профиль ОПОП. Вместе с тем, в действующем ФГОС 3+ сказано, что профиль ОПОП отражает вариативный блок дисциплин. Логично заключить, что дисциплины базового блока должны дополнять содержание профильных дисциплин и обеспечивать получение знаний и умений по отдельным наиболее важным проблемам и разделам инженерных наук. Эти дисциплины реализуют преимущественно общепрофессиональные компетенции (ОПК). К ним относятся: техническая механика, материаловедение, технологические процессы в машиностроении, введение в специальность, инженерная графика, надёжность машин, электротехника и электроника, гидравлика, автоматизированное проектирование и др. Текущие формулировки ОПК приводятся в действующем на момент написания данной статьи ФГОС ВО по обсуждаемому направлению подготовки.

Содержание универсальных компетенций (УК) раскрывается в макете примерной основной образовательной программы для области образования «Инженерное дело, технологии и технические науки» (бакалавриат), представленном на сайте fgosvo.ru. С формированием УК в ОПОП связано изучение ряда обязательных дисциплин: философия, история, иностранный язык, безопасность жизнедеятельности, физическая культура и спорт. Некоторые части УК приобретаются в процессе межличностного общения при выполнении студентом самостоятельной или научной работы в вузе, а также в ходе прохождения производственной практики на предприятиях.

Обращает на себя внимание отсутствие явных формальных требований к объёму знаний и умений обучающегося в области естественнонаучных (общеобразовательных) дисциплин, таких как математика, физика, химия. Общий подход к проектированию образовательных программ по ФГОС

3++, который демонстрируют разработчики новых учебных планов, состоит в сокращении объёмов общеобразовательных дисциплин. Отчасти это оправдано, т.к. устраняет избыточность и дублирование информации, например, в разделах физики, технической механики, электротехники. Но в то же время в формулировках общепрофессиональных и универсальных компетенций присутствуют требования, такие как выбор «оптимальных способов решения задач», следование принципам «образования в течении всей жизни», удовлетворение которых невозможно без наличия базовых знаний по математике, физике, химии и другим общеобразовательным дисциплинам и междисциплинарным курсам [3].

Выводы

Нисходящее проектирование ОПОП рассматривается с точки зрения осуществления выпускником программы бакалавриата будущей трудовой деятельности и производится в направлении от заданных компетенций к перечню дисциплин. В этом случае содержание учебных дисциплин разрабатывается на основе требований к знаниям и умениям,

необходимым для выполнения трудовых функций, перечисленных в профессиональных стандартах. Содержательные линии (блоки дисциплин) ОПОП в полной мере должны соответствовать задачам формирования профессиональных, общепрофессиональных и универсальных компетенций. Основным результатом реализации обсуждаемого подхода является формирование образовательной программы, отвечающей современным требованиям образовательных стандартов.

Список литературы

1. Надвоцкая В.В. Проектирование основной образовательной программы по направлению подготовки бакалавров технического вуза с учетом мнения работодателей. Автореферат дис. кандидата педагогических наук: 13.00.08 / Алтайская государственная педагогическая академия. Барнаул, 2013. – С. 22.
2. Проскурин В.Д. Формирование образовательных программ на основе профессиональных стандартов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры [Электронный ресурс]: материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием); Оренбург. гос. ун-т. - Электрон. дан. - Оренбург: ОГУ, 2017 - http://conference.osu.ru/registration/about_members.html?filter=15/
3. Смирнов В.В. Подготовка инженера-исследователя в области математического моделирования // Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: материалы VI международной научно-технической конференции: Часть 2, Барнаул, 23 – 26 сентября 2014 г. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – С. 168 – 174.

**EDUCATIONAL PROGRAM DEVELOPMENT FOR THE BACHELOR DEGREE
IN MECHANICAL ENGINEERING IN TERMS
OF THE NEW EDUCATIONAL STANDARDS**

Smirnov V.V., C.Sc. (Engineering), Associate professor, e – mail: v2s0@yandex.ru,
Ovcharenko A.G., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: shura@bti.secna.ru,
Firsov A.M., C.Sc. (Engineering), Associate professor, e – mail: firsov.am@yandex.ru

Biysk Technological Institute, the branch of the Altay State Technical University, 27, Trofimov Street,
Biysk, 659305, Altai Territory, Siberian Federal District, Russian Federation

Abstract

The author of the article considers some approaches to solving the problem connected with the development of the basic professional educational program for the Bachelor Degree in Mechanical Engineering. The educational program should be based on the requirements of the latest educational standards. This problem can be solved by the method of top-down design. Professional activity tasks are formulated in terms of professional standards requirements. The contents of professional competencies reflect the wording of labor functions of professional standards. The top-down design of the curriculum is carried out from the certain competences to the list of academic disciplines. The contents of the basic professional educational program must respond the goal of mastering of general, universal and professional competencies.

The result of this approach is primarily the educational program that meets up-to-date requirements of educational standards.

Keywords: Bachelor of Mechanical Engineering, basic educational program, professional standards.

УДК 378.1

СИТУАЦИОННЫЙ ПОДХОД К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ОБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*АБСАЛЯМОВА Г. А., аспирант
(АлтГТУ, г. Барнаул)*

Абсалямова Г.А. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
е – mail: rozina128@mail.ru

Аннотация

Вуз является поставщиком высококвалифицированных кадров для реального сектора экономики. Современным вузам приходится работать в условиях динамичности внешней среды. На университет оказывает влияние большое количество внутренних и внешних факторов, которые носят ситуационный характер. Решение данной проблемы предполагает поиск новых подходов к совершенствованию образования в области машиностроения. Применение ситуационного подхода является перспективным направлением в современных условиях функционирования вуза.

Ключевые слова: образование, внешняя среда, университет, ситуационный подход, неопределенность.

Введение

Образование и наука составляют базу интеллектуальных ресурсов, воплощаемых в новых технологиях и продуктах. Рынок высоких технологий и наукоемких производств определяет место России в мировой экономике, поэтому задачам создания инновационной экономики придается особое значение.

Система экономики знаний представляет собой совокупность институциональных единиц, деятельность которых направлена на воспроизводство знаний, научной информации и нововведений. В качестве подобной институциональной единицы инновационной экономики выступает университетский комплекс со своим образовательным, научно-исследовательским и инновационным потенциалом [1].

В настоящее время российская система образования находится в условиях постоянного реформирования. Старые подходы плохо работают в современных экономических условиях, а новые все еще находятся на стадии формирования. Особое значение придается формированию высококвалифицированных специалистов, ориентированных на потребность предприятий реального сектора экономики, другими словами на первый план выходит взаимодействие вузов с внешними заинтересованными группами [7].

Ситуационный подход является современным направлением управленческой мысли, которое зародилось в 60 – 70-е гг. XX века. Точкой отсчета принято считать 1971 г., когда появилась статья Р. Моклера «Ситуационная теория управления», в которой автор призывал к усилению внимания исследователей к внешней среде организации, к учету специфики конкретных ситуаций.

Ситуационному подходу посвящены работы многих зарубежных и отечественных ученых, например, Г.Кунца и С. О’Доннела, И. Ансоффа, А.Ю.Филипповича, Н.М.Солодухо, О.И. Куликовой и др.

Применение ситуационного подхода к совершенствованию образовательной деятельности является перспективным направлением в современных условиях функционирования вуза. Целью данного исследования является анализ внешних факторов, влияющих на систему образования в области машиностроения, и выявление направлений и путей ее (системы образования) совершенствования в рамках использования ситуационного подхода.

Описание теоретического исследования

Современным вузам приходится работать в условиях роста конкуренции на рынке образовательных услуг. К тому же меняется сам характер и содержание конкуренции: она распространяется не только на потребителей образовательных услуг, но и на основные стейкхолдеры, преподавателей и репутацию. Эти обстоятельства определяют объективные условия функционирования университета [8]:

- динамичность внешней среды;
- рост конкуренции, а также изменение ее характера;
- дефицит квалифицированных кадров;
- перераспределение относительной важности стейкхолдеров;
- увеличение внутриорганизационных конфликтов.

Основными структурными единицами системы образования в области машиностроения являются кафедры, которые обеспечивают в университете образовательный процесс, высокий интеллектуальный потенциал и научную составляющую деятельности. Но, учитывая специфику вуза как организации, кафедра обладает достаточной степенью самостоятельности, поэтому ее можно рассматривать как открытую систему, которая обменивается ресурсами и информацией с внешней средой. Изменения во внешней среде оказывают прямое и косвенное воздействие на университет в целом, и кафедру в частности. Также, являясь элементом организационной структуры вуза, на кафедру влияет менеджмент вуза.

Что касается качества инженерного образования, то современное состояние подготовки инженеров в России большинством экспертов оценивается как кризисное. Отмечено, что критическое состояние инженерного образования обусловлено неспособностью адекватно и своевременно ответить на вызовы последнего времени, среди которых наиболее острыми являются [6]:

- Конкуренция на мировом рынке инженерного труда;
- Вступление России в ВТО;
- Переход на подготовку специалистов в соответствии с принципами Болонской декларации;
- Отсутствие общих требований к квалификации специалистов в области техники и технологии, а также профессиональных стандартов, учитывающих переход на уровневую систему подготовки;
- Рыночные отношения с работодателями;
- Противоречие между прежней системой подготовки инженеров и новыми требованиями к ним со стороны промышленности;
- Стареющая материальная и кадровая база вузов;
- Резкое снижение престижа инженерного труда и инженерной профессии;
- Снижение качества школьного, начального и среднего профессионального образования.

Все перечисленные выше факторы носят ситуационный характер, т.е. обусловлены ситуацией. Понятие ситуации можно определить через переменные, указанные на рисунке.

Ситуация – это комплексное, многомерное и многофакторное понятие, характеризующее динамические взаимосвязи большого числа показателей развития субъектов, объектов и предметов взаимодействия. Именно ситуации составляют основу ситуационного подхода.

На вуз, как и любую организацию оказывают влияние не просто субъекты, будь то потребители, конкуренты, партнеры или органы власти. На вуз влияют процессы, события, состояния и отношения, порождаемые деятельностью этих субъектов. Поэтому внешнее окружение вуза (кафедры) можно представить, как совокупность сред: экономической, политико-правовой, образовательной, научно-инновационной, международной, информационной и демографической [2]. Подробное описание представлено в таблице.



Рисунок – Классификация понятия «ситуация» [9]

Характеристика внешней среды вуза

| № | Наименование среды | Факторы среды | Контактная аудитория |
|---|----------------------------|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Экономическая среда | экономическое развитие РФ и регионов, рынок образовательных услуг, рынок труда, рынок научно-технической продукции и услуг, рынок интеллектуальной собственности, рынок материально-технических ресурсов | Потребители, поставщики, конкуренты, посредники |
| 2 | Политико-правовая среда | политическая обстановка, система нормативно-правовых актов федерального уровня, органов власти субъектов и органов местного самоуправления, а также локальные нормативные акты, регламентирующие основные виды деятельности вуза | органы законодательной, исполнительной и судебной власти РФ, субъектов РФ и органов местного самоуправления, вузы, политические партии, общественные объединения, органы, осуществляющие контроль и надзор в сфере образования |
| 3 | Образовательная среда | образовательные стандарты, образовательные программы (основные и дополнительные), образовательные технологии, научно-педагогические школы и т.д. | органы власти, вузы, сузы, школы, лицеи, гимназии, работодатели, абитуриенты и их родители, студенты, выпускники, педагогические работники, общественные объединения |
| 4 | Научно-инновационная среда | уровень научно-технологического прогресса, научные школы, система интеллектуальной собственности и результатов научной и научно-технической дея- | государственные органы, вузы, научные сотрудники, научно-исследовательские институты, малые инновационные предпри- |

| | | | |
|---|---------------------|--|---|
| | | тельности, инновации. | ятия, наукоемкие предприятия, бизнес-инкубаторы, технопарки |
| 5 | Международная среда | система международного права, экономика, политика, социокультурная среда, нормативно-правовая база, уровень развития технологии, образовательная система | органы государственной власти зарубежных стран, вузы, образовательные и научные учреждения и организации, мировое академическое сообщество, иностранные абитуриенты |

Продолжение Таблицы

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|-----------------------|--|---|
| 6 | Информационная среда | информационные процессы и технологии, системы хранения информации и базы данных, коммуникационные каналы и сети | органы власти, потребители, поставщики, конкуренты, партнеры, посредники, работодатели, общественные объединения, академическое сообщество и т.д. |
| 7 | Демографическая среда | численность населения, численность и состав населения трудоспособного возраста, возрастно-половой состав, социально-демографический состав, образовательная и трудовая мобильность, миграция | население |

Источник: составлено автором

В данной классификации особый интерес представляет информационная среда, которая охватывает всю контактную аудиторию вуза.

Информационная среда является средой, «в которой происходит научно-исследовательская и конструкторско-техническая деятельность, а также планирование науки и техники и управление ими» [10].

В целом, информационная среда довольно сложна и разнородна. В ее состав входят личные контакты, и переписка, обмен рукописями, препринтами и оттисками, семинары и конференции, научные журналы и другие издания, а также система научной информации. Именно информационная среда выступает посредником в научном диалоге.

С информационной средой неразрывно связано понятие неопределенности.

Неопределенность – это относительное количество информации о среде и уверенность в ее точности [5]. Неопределенность характеризует внешнюю среду с точки зрения ее восприятия субъектом управления. Можно выделить неопределенность трех видов: неопределенность среды (1-ого рода), неопределенность выбора решения (2-ого рода) и неопределенность будущей реализации данного решения (3-его рода) [3].

Для настоящей работы интерес представляет неопределенность 1-ого рода, т.е. неопределенность среды.

Внешняя среда (ситуация), с которой сталкиваются организации, не одинакова, поэтому ей соответствуют различные уровни неопределенности, которые могут быть классифицированы на основе анализа двух характеристик [4]:

- степени простоты или сложности среды;
- степени стабильности или нестабильности (динамичности).

Первая характеристика имеет отношение к количеству и однородности внешних элементов, связанных с деятельностью организации. Степень стабильности/динамичности определяется темпам

изменения внешней среды. Чем выше степень сложности и динамичности, тем неопределенней является сложившаяся ситуация для университета.

Внешняя среда для университета по степени простоты/сложности характеризуется большим числом субъектов, влияющих на его деятельность, причем эти факторы носят неоднородный характер. Университеты вступают во взаимодействие с правительством и фондовыми учреждениями, профессиональными и научными ассоциациями, выпускниками, корпорациями. То есть среда является сложной. Но не смотря на множественность элементов, они достаточно стабильны, т.е. меняются с течением времени, но перемены относительно постепенны и предсказуемы. Хотя в последнее время происходит сдвиг среды в стороны большей динамичности, и это нельзя не учитывать.

Таким образом, вуз находится во взаимоотношениях с внешней средой, которые могут быть охарактеризованы состоянием «сложная- относительно стабильная внешняя среда», что представляет собой в некоторой степени более высокий уровень неопределенности, но умеренный.

Выводы

Вуз является поставщиком высококвалифицированных кадров для реального сектора экономики. Основными структурными единицами системы образования является кафедры, которые обеспечивают в университете образовательный процесс, высокий интеллектуальный потенциал и научную составляющую деятельности.

Современным вузам приходится работать в условиях динамичности внешней среды. На университет оказывает влияние большое количество внешних факторов, которые носят ситуационный характер. Внешних факторов могут быть классифицированы на экономические, политико-правовые, образовательные, научно-инновационные, международные, информационные и демографические. С информационной средой неразрывно связано понятие неопределенности.

Современный вуз находится во взаимоотношениях с внешней средой, которые могут быть охарактеризованы состоянием «сложная- относительно стабильная внешняя среда», что обусловлено большим числом влияющих разнородных элементов, которые достаточно стабильны во временном измерении.

Решение проблемы совершенствования инженерного образования предполагает поиск новых подходов к совершенствованию образования в области машиностроения. Применение ситуационного подхода является перспективным направлением в современных условиях функционирования вуза.

Ситуационный подход подразумевает учет всех факторов внешней и внутренней среды, влияющих на систему образования; определение фактора неопределенности среды; поиск технологий и методов повышения эффективности образования в области машиностроения на основе анализа ситуации.

Список литературы

1. Абсалямова Г.А. Анализ инновационной деятельности предприятий машиностроения: пути сотрудничества с университетским комплексом// Актуальные проблемы в машиностроении. - 2016. - № 3. - С. 492 – 497.
2. Абсалямова Г.А., Бородин В.А. Влияние внешней среды на систему управления вузом// Вестник алтайской науки. - 2015. - № 3-4 (25-26). – С. 15 – 20.
3. Авдийский В.Н. Безденежных В.М. Неопределенность, изменчивость и противоречивость в задачах анализа рисков поведения экономических систем// Эффективное антикризисное управление. - 2011. - № 3 (66). - С. 46 – 61. Зуб А. Т. Стратегический менеджмент: Теория и практика: Учебное пособие для вузов. — М.: Аспект Пресс, 2002. — 415 с.

4. Мескон М., Альберт М., Хедоури Ф. Основы менеджмента/ Под ред. Л.И. Евенко, пер. с англ. - М: Издательство «Дело», 1997. – 704 с.
5. Огородова Л.М., Кресс В.М., Похолков Ю.П. Инженерное образование и инженерное дело в России: проблемы и решения// Инженерное образование. - 2012 - № 11. – С.18 – 23.
6. Ситников А.А., Бородин В.А., Маркова М.И., Розина Г.А. Создание машиностроительных учебно-производственных центров (на материалах АлтГТУ) // Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ. - 2015. - С. 485 – 489.
7. Стратегии развития российских вузов: ответы на новые вызовы/ Под науч. ред. Н.Л. Титовой – М.: МАКС Пресс, 2008. – 668 с.
8. Цаленко М.Ш. Моделирование семантики в базах данных — М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1989. — 288 с.
9. Шрейдер Ю. А. Информационные процессы и информационная среда // Научно-техническая информация. - 2008. - Сер. 2: Информационные процессы и системы. № 9. – С. 3 – 7.

CONTINGENCY APPROACH TO IMPROVEMENT OF ENGINEERING EDUCATION

Absalyamova G. A., Post-graduate Student, e – mail: rozina128@mail.ru

Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina st., Barnaul, 656038, Russian Federation

Abstract

The higher education institution provides real sector of economy with highly qualified staff. The main structural units of higher education system are departments involved in educational process have high intellectual potential and a scientific component of activity at university.

Modern higher education institutions have to work in the conditions of the external environment dynamism. The university is impacted on by a large number of external factors of situational character. Classification of external factors on economic, political and legal, educational, scientific and innovative, international, information and demographic is offered. The concept of uncertainty is inseparably linked with the information environment. The higher education institution is situated in the external environment with moderate degree of uncertainty.

The solution of this problem assumes the search of new approaches to improvement of education in the field of mechanical engineering. Application of contingency approach is the perspective direction in modern conditions of higher education institution activity.

Keywords: education, external environment, university, contingency approach, uncertainty.

**ЦЕЛЕВАЯ ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ В НГТУ
ПРОГРАММЫ «НОВЫЕ КАДРЫ ОПК»**

*НИКИТИН Ю. В., канд. техн. наук, доцент,
СУРНИНА Т. Ю., канд. педагог. наук
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Никитин Ю.В. – 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: y.nikitin@adm.nstu.ru

Аннотация

В статье анализируется трехлетний опыт целевой подготовки кадров, реализуемой университетом в рамках программы министерства образования и науки Российской Федерации «Новые кадры для ОПК». Подготовка кадров, которая ведется в интересах предприятий оборонно-промышленного комплекса, аккумулирует и демонстрирует лучший опыт реализации практико-ориентированного подхода в образовании. Для обеспечения качественного набора на программы целевой подготовки применяются разнообразные виды профориентационной работы, в том числе, с активным привлечением к проведению мероприятий предприятий – партнеров.

Ключевые слова: целевая подготовка, практико-ориентированный подход, профессиональные компетенции, машиностроительные предприятия, профориентация.

Введение

В настоящее время особое значение для развития любого вуза имеет его влияние на экономические процессы региона, активное участие в развитии за счет опережающей подготовки кадров, способных применять современные технологии на производстве. Для Новосибирского государственного технического университета такое взаимодействие с промышленными предприятиями и научными учреждениями региона является определяющим, носит комплексный характер и не ограничивается организацией производственных практик и подготовкой инженерных и научных кадров. Так, университет выступил инициатором кластерной подготовки квалифицированных кадров в Новосибирской области по модели «школа – техническое училище – техникум – вуз – предприятие». Такой подход успешно реализован в интересах Филиала ПАО «Компании «Сухой» «НАЗ им. В.П. Чкалова». В тесном взаимодействии со специалистами предприятия создаются целевые образовательные программы, предусматривающие проведение практических и лабораторных занятий, а также всех видов практик непосредственно на производстве. Ученые, аспиранты и студенты участвуют в выполнении НИОКР по заказу предприятия, решая насущные производственные проблемы, создавая новые технологии и конструкции.

По аналогичной схеме строится взаимодействие с другими предприятиями оборонно-промышленного комплекса в Сибирском регионе.

Особенности реализации программ целевой подготовки

Особенности реализации программ целевой подготовки состоят в том, что, во-первых, предприятие набирает ограниченный круг выпускников выбранных направлений подготовки или специ-

альностей, а, во-вторых, проекты реализуются последние два года подготовки непосредственно перед выпуском. В связи с этим появляется задача в рамках существующих образовательных программ создать возможность обучения студентов по индивидуальным траекториям, настроенным на требования конкретного предприятия. Для решения этой задачи по каждому проекту целевой подготовки разрабатывается особый образовательный модуль, который может включать дополнительные профессиональные дисциплины и практики. При этом необходимо сохранять общую трудоемкость образовательной программы в рамках, определенных федеральными государственными образовательными стандартами высшего образования (ФГОС ВО) по соответствующему направлению подготовки. В соответствии с данными ограничениями дополнительные дисциплины образовательных модулей включаются в учебные планы в качестве факультативных или элективных дисциплин, а обязательную часть таких модулей составляют практики, которые для целевых студентов проводятся на предприятиях-партнерах. Важной составляющей образовательного модуля является реализация комплексных междисциплинарных курсовых проектов по тематике предприятий-партнеров. Для программ специалитета и магистерской подготовки в образовательные модули может также включаться научно – исследовательская работа, выполняемая студентами по тематике предприятий партнеров.

Результаты и обсуждение

Успешное сотрудничество с предприятиями позволило НГТУ участвовать и три года подряд (начиная с 2014 года) выигрывать конкурсы по целевой подготовке кадров для предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК) [1]. Проекты целевой подготовки кадров для предприятий ОПК к настоящему моменту реализуются в рамках девяти укрупненных групп направлений и специальностей (УГНС) по восьми направлениям подготовки бакалавров, четырем направлениям магистерской подготовки, по двум специальностям прямой подготовки, а также по двум направлениям подготовки кадров высшей квалификации в аспирантуре. По программам, которые стартовали в 2015 и в 2016 годах, проходят обучение 140 обучающихся. По программе целевой подготовки кадров 2014 года обучение завершили 75 студентов, часть из которых продолжили обучение по программам более высокого уровня, часть успешно трудоустроилась на предприятиях ОПК.

В рамках программы целевой подготовки для предприятий ОПК в 2015 году НГТУ получил из федерального бюджета средства для создания базового учебного научно-производственного центра «Технологии высокоресурсных авиационных конструкций» в Филиале ПАО «Компании «Сухой» «НАЗ им. В.П. Чкалова», деятельность которого направлена на углубление партнерского взаимодействия с профессиональными образовательными учреждениями, предприятиями и научными организациями Новосибирской области со сферой деятельности, охватывающей авиастроение, а также с опорными вузами ПАО «ОАК», для подготовки высококвалифицированных специалистов, способных решать широкий спектр задач повышения ресурса авиационных конструкций. Научно-исследовательские работы в базовом центре проводятся преподавателями и аспирантами кафедры самолето- и вертолетостроения НГТУ, с участием ведущих специалистов Филиала ПАО «Компании «Сухой» «НАЗ им. В.П. Чкалова». Партнерами по реализации программы выступают также другие ведущие предприятия региона, обеспечивающие оборонный заказ страны.

При реализации целевой подготовки ключевым является фактор непосредственной погруженности выпускников в среду предприятия, на котором им предстоит работать. Следовательно, обязательным элементом такой подготовки является применение практико-ориентированных образовательных технологий [2], к числу которых относятся проведение занятий (практик) непосредственно на производстве, использование в качестве учебных задач реальных проектов и технологий, привлечение студентов к выполнению прикладных исследований.

Тематика проектов целевой подготовки направлена на разработку таких образовательных модулей, которые позволили бы выпускникам НГТУ быть полезными предприятиям в решении важнейших для них задач развития и обеспечения производства качественной продукции.

Ориентация образовательных модулей на проведение всех видов практик исключительно на предприятиях-партнерах, привлечение к ведению занятий специалистов-практиков, обладающих большим опытом, знаниями технологий и производственных процессов, позволяет студентам погрузиться в среду предприятия еще в ходе обучения, что значительно снижает период адаптации молодого специалиста при его устройстве на работу.

В качестве иллюстрации приведем несколько примеров реализации проектов целевой подготовки. В ОАО «Институт прикладной физики» организован филиал кафедры «Газодинамических устройств» НГТУ, при реализации образовательного модуля «Подготовка высококвалифицированных специалистов в области разработки выстреливаемых средств» используется производственное оборудование научной организации. Студенты, прошедшие подготовку и аттестацию по образовательному модулю должны быть готовы к производственной, проектно-технологической и научно-исследовательской профессиональной деятельности по проектированию и технологической подготовке производства средств взрывания в качестве конструктора, инженера-исследователя и разработчика технологических процессов производства. Образовательный модуль, разработанный в рамках реализуемого проекта, включает в себя ряд специальных дисциплин и полигонную практику (табл. 1).

Таблица 1

План образовательного модуля
«Проектирование, производство, испытания и утилизация средств взрывания»

| № п/п | Наименование дисциплины (практики и пр.) | Всего академических часов | В том числе совместно с организациями ОПК, часов | Формы контроля |
|-------|--|---------------------------|--|--|
| 1. | Научно-исследовательская работа | 72 | 72 | Тезисы (доклад) на конференции, дифференцированный зачет, раздел в выпускной квалификационной работе |
| 2. | Дисциплина 1 | 144 | 64 | Экзамен, расчетно-графическая работа |
| 3. | Дисциплина 2 | 144 | 10 | Дифференцированный зачет, расчетно-графическая работа |
| 4. | Дисциплина 3 | 144 | 10 | Курсовой проект, экзамен, раздел в выпускной квалификационной работе |
| 5. | Полигонная практика | 72 | 72 | Дифференцированный зачет |
| | ИТОГО | 504 | 156 | |

Как видно из данных, представленных в таблице, организации ОПК принимают непосредственное участие в реализации всех составляющих образовательного модуля

Важнейшим этапом, на котором делают акцент разработчики образовательных модулей, является согласование с работодателями профессиональных компетенций (ПК), осваиваемых студентами в рамках проектов целевой подготовки.

Примером может служить проект, реализуемый в партнерстве с АО «НЭВЗ – Союз». Проект направлен на изучение студентами образовательного модуля «Оборудование для производства изделий промышленных средств специального назначения». Задачей проекта является освоение следующих профессиональных компетенций, прикладное содержательное наполнение которых определено совместно с предприятием-партнером:

ПК 1. Способность участвовать в разработке проектов изделий машиностроения, средств технологического оснащения и автоматизации машиностроительных производств, технологических процессов их изготовления и модернизации. В рамках данной компетенции студенты будут:

- иметь практический опыт в разработке оборудования с учетом качества исходных материалов и соответствия полученного образца требованиям технического задания;
- уметь выбирать средства автоматизации и диагностики производственных объектов машиностроительных производств;
- уметь проводить диагностику состояния и динамики производственных объектов машиностроительных производств с применением необходимых методов и средств анализа;
- знать и уметь применять закономерности и связи процессов проектирования и создания машин, метод разработки технологического процесса изготовления машин, принципы производственного процесса изготовления машин, технологию сборки, правила разработки технологического процесса изготовления машиностроительных изделий;
- знать технико-экономические показатели и критерии работоспособности оборудования машиностроительных производств, классификацию оборудования.

ПК 2. Готовность выполнять работы по моделированию продукции и объектов машиностроительных производств с использованием стандартных пакетов, и средств автоматизированного проектирования, применять алгоритмическое и программное обеспечение средств и систем машиностроительных производств.

Составляющие компетенции:

- иметь практический опыт разработки средств технологического оснащения, автоматизации и диагностики с учетом технологических, эксплуатационных, эстетических, экономических, управленческих параметров;
- уметь применять принципы обеспечения экологической безопасности при решении практических задач в области конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств;
- уметь применять известные методы для решения технико-экономических задач в области конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств;
- знать специализированные программные средства для решения задач в области конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств;
- знать и уметь применять методы и средства автоматизации выполнения и оформления проектно-конструкторской документации.

Таким образом, достаточно общие формулировки компетенций, предлагаемые образовательными стандартами, в ходе разработки образовательных модулей приобретают вид конкретных умений по решению задач профессиональной деятельности, отвечающих требованиям к квалификации персонала предприятия-партнера.

Еще одним важнейшим аспектом целевой подготовки является привлечение специалистов предприятий-партнеров к образовательному процессу [3]. Ежегодно к проведению занятий по программам целевой подготовки привлекается около 40 специалистов – сотрудников предприятий, то есть в среднем по 3 – 4 специалиста на проект. При этом студенты не только проводят на предприя-

тии значительную часть учебного времени, проходя производственную и преддипломную практику, но и трудоустраиваются на предприятия на условиях частичной занятости. Все это позволяет молодому специалисту заранее познакомиться с производством, сокращает период его адаптации на предприятии, обеспечивая необходимый эффект практико-ориентированного обучения.

Ярким примером, демонстрирующим все аспекты практико-ориентированного обучения, являются проекты целевой подготовки кадров для ПАО "Компания "Сухой" "НАЗ им. В.П. Чкалова. Основной целью проектов является подготовка студентов, готовых к профессиональной деятельности в области технологий производства и послепродажного обслуживания высокоресурсной военной и гражданской авиационной техники в качестве инженеров-технологов и инженеров-конструкторов третьей, второй, первой категорий. Общая тема проектов является сквозной в образовательных модулях на разных уровнях подготовки, от бакалавриата, до специалитета и магистратуры. Такой подход дает возможность выпускникам бакалавриата, по согласованию с будущим работодателем, получать более высокую квалификацию на уровне магистратуры. Кроме того, кафедра самолето- и вертолетостроения НГТУ обеспечивает тесную связь с производством, трудоустраивая своих студентов еще во время обучения.

Анализируя опыт реализации программ целевой подготовки кадров, нельзя не остановиться на таком важнейшем элементе, как профориентационная работа. Без преувеличения можно сказать, что хороший уровень подготовки абитуриентов обеспечивает половину успеха всей программы. К сожалению, следует отметить, что в исторически сложившейся практике на места целевой подготовки, как правило, проходят абитуриенты с достаточно низким средним баллом. Тем значительнее факт, что с началом реализации программ подготовки кадров для предприятий ОПК, начинает меняться и отношение к отбору поступающих. Высокие требования к выпускникам целевой подготовки со стороны предприятий-партнеров заставляют вуз более тщательно выбирать желающих обучаться по таким программам.

С целью обеспечения высокого уровня поступающих, участвующие в программе кафедры, проводят большой спектр профориентационных мероприятий, от традиционных дней открытых дверей, до преподавания некоторых учебных дисциплин непосредственно в школах и лицеях. На базе НГТУ ежегодно в каждом семестре проводится не менее 40 профориентационных мероприятий, больше половины, которых организовано техническими факультетами и кафедрами, участвующими в целевой подготовке кадров для оборонно-промышленного комплекса. В сумме более тысячи студентов, абитуриентов и их родителей ежегодно принимают в них участие.

Кафедры проводят экскурсии для школьников всего сибирского региона по своим лабораториям, демонстрируют возможности уникального оборудования, проводят встречи и лекции ведущих ученых. Популярной формой являются экскурсии на предприятия-партнеры, которые проводят специалисты этих предприятий.

Интересной и очень эффективной является практика факультета летательных аппаратов по привлечению магистрантов к проведению учебных занятий со школьниками профильных школ, например, технического лицея НГТУ. Магистранты, обучающиеся по программе целевой подготовки, выезжают для проведения встреч со школьниками в другие города за пределы Новосибирской области, тем самым привлекая абитуриентов из соседних регионов. На всех технических факультетах ведется активная работа со школьниками г. Новосибирска, Новосибирской области и Алтайского края, проводятся выездные мероприятия, финансирование которых производится, в том числе, за счет средств предприятий-партнеров.

К числу мероприятий, собирающих большое количество абитуриентов и их родителей, относится «День открытых дверей в НГТУ», в котором принимают участие все факультеты университета. Формат мероприятия позволяет встретиться с ведущими преподавателями всех кафедр, студентами и специалистами предприятий, которые активно принимают на работу выпускников НГТУ.

Гости могут совершить экскурсии на факультеты, познакомиться с научной и производственной деятельностью кафедр, а также центров и лабораторий университета, в том числе таких как: учебный центр современных металлообрабатывающих технологий "DMG – НГТУ"; научно-образовательные центры "Сварочные технологии" - "НГТУ- "Kjellberg Finsterwalde", "Нанотехнологии", "Лазерные и плазменные технологии", НОЦ в области машиностроения "НГТУ – ИТПМ СО РАН"; Центр прототипирования; учебно-научные лаборатории "Термическая обработка материалов", "Плазменные покрытия". Гостей знакомят с фундаментальными и прикладными исследованиями в области создания новых материалов с уникальными свойствами, исследования структурных превращений в металлических материалах, технологий производства керамики и керамических композитов, исследования процесса образования водорода и нановолокнистого углерода, исследования способов модификации углеродных нанотрубок и нановолокон, управления качеством поверхностного слоя деталей машин при интеграции поверхностной термической и механической обработок, технологий плазменного нанесения покрытий на детали машин, разработки технологических процессов в области лазерной и плазменной резки, поверхностной термообработки, сварки, маркировки, а также электрохимической и ультразвуковой обработки, разработки опытных образцов установок и модернизация существующего оборудования в области электрофизических методов обработки. Открытая демонстрация научных, образовательных, технических возможностей университета способствует притоку заинтересованных абитуриентов, наиболее подготовленных к обучению в НГТУ.

Уникальной формой совместной работы разных целевых групп является семинар «Проблемы современного материаловедения». Это единственный в России семинар, который ежегодно проводится в течение более чем 45 лет. Слушателями семинара являются ученики 10 – х и 11 – х классов средних учебных заведений, преподаватели, аспиранты, студенты вузов Сибири, ученые СО РАН, сотрудники научно-исследовательских институтов и промышленных предприятий Новосибирска. Темы заседаний семинара посвящены актуальным вопросам современного материаловедения, технологий создания и обработки новых материалов, в том числе керамическим материалам, наноструктурным функциональным материалам, нанокпозиционным материалам и технологиям получения изделий из керамических материалов. Особое внимание заслуживают доклады ведущих зарубежных исследователей и производителей изделий из керамики.

На постоянной основе проводятся собрания – встречи выпускников и родителей с представителями учебных заведений среднего профессионального образования и высшего образования, а также представителями предприятий ОПК, участвующими в целевой подготовке. Такие встречи организуются силами районных управлений образования и Главным управлением образования г. Новосибирска при содействии Ассоциации лицеев и гимназий, главным учредителем которой является НГТУ.

Еще одной интересной формой профориентации, организованной механико-технологическим факультетом, является выполнение научно-исследовательских работ с учениками 10-х и 11-х классов Технического лицея НГТУ. Каждый семестр занятия проводятся один раз в неделю. Перед школьниками ставятся задачи, связанные с исследованием механических свойств функциональных керамических материалов. Перед постановкой научных задач организуется ознакомительная экскурсия в ХК ПАО «НЭВЗ – Союз». Школьники знакомятся с современным керамическим производством с практической точки зрения. Подобные мероприятия помогают ребятам более точно понять, что их ожидает, если они выберут для поступления, реализуемые в НГТУ направления подготовки.

В НГТУ успешно функционирует Студенческое конструкторское бюро "Робототехника и искусственный интеллект" под руководством И.В. Яковина, в котором могут попробовать свои силы в робототехнике как студенты, так и школьники. Встречи представителей предприятий-партнеров со

студентами проходят не только в рамках учебной программы или производственных практик, но и на конференциях, организованных на постоянной основе семинарах.

Выводы

Обобщая результаты трех лет реализации программ целевой подготовки кадров для предприятий оборонно-промышленного комплекса, следует отметить целый ряд факторов, положительно повлиявших на методы организации и результаты образовательного процесса.

Во-первых, рамки программ целевой подготовки позволили привлечь представителей предприятий-партнеров не только к выработке особых требований к выпускникам образовательных программ и разработке образовательных модулей, но и к непосредственному участию в образовательном процессе. Такое тесное взаимодействие, в свою очередь, обеспечивает устойчивые связи с предприятиями и в других сферах, в частности, в проведении совместных научных исследований и разработок.

Во-вторых, реализация целевой подготовки позволила преподавателям кафедр, участвующим в программе, приобрести опыт применения практико-ориентированного подхода, который существенно повлиял на мотивацию студентов, повышение качества их подготовки, сокращение периода адаптации выпускников при трудоустройстве.

В-третьих, в рамках программы существенно расширился спектр профориентационных мероприятий, проводимых с целью привлечения заинтересованных и хорошо подготовленных абитуриентов. Положительный опыт такой работы может быть распространен на все факультеты и кафедры.

В рамках данной статьи не был затронут еще один важный аспект реализации программ – это проведение стажировок преподавателей на предприятиях-партнерах. Поскольку реализация целевой подготовки продолжается, в дальнейшем планируется провести подробный анализ и этого аспекта.

В целом опыт реализации программ целевой подготовки кадров дает основание говорить о необходимости дальнейшего совершенствования образовательных программ, выявления лучших образовательных практик и технологий, дальнейшего их распространения на другие образовательные программы, реализуемые в университете.

Список литературы

1. Батаев А.А. Новосибирский государственный технический университет для ОПК России // Образование: цели и перспективы. 2015. – № 41. – С. 50 – 53.
2. Огородова Л.М. Инженерное образование и инженерное дело в России: проблемы и решения // Инженерное образование. 2012. – № 11. – С. 18 – 23.
3. Загвязинский В.И. Наступит ли эпоха возрождения?.. Стратегия инновационного развития российского образования: монография. М.: Логос, 2014. – 140 с

**TARGET TRAINING OF HUMAN RESOURCES FOR ENGINEERING
ENTERPRISES IN FRAMEWORK OF IMPLEMENTATION IN NSTU
THE PROGRAMS "NEW HUMAN RESOURCES OF THE
MILITARY – INDUSTRIAL COMPLEX "**

Nikitin Yu.V., PhD in Engineering, Assistant Professor, e – mail: y.nikitin@adm.nstu.ru

Surnina T.Yu., PhD in Pedagogic sciences, e – mail: laos@smc.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The article analyzes the three-year experience of special training, implemented by the University in the framework of the Ministry of education and science of the Russian Federation "New personnel for the industry". The personnel training in the interests of the engineering enterprises of the defense industrial complex, accumulates and demonstrates best practices in practice-oriented approach to education. The technology of educational programs adaptation to solving problems of practice-oriented training including enterprises partner cooperation discusses.

To ensure quality recruitment for targeted training programs use a variety of vocational guidance types, including active attraction of partner enterprises to carrying out of actions.

Keywords: target training, practice-oriented approach, professional competence, engineering enterprises, vocational guidance.

УДК 37.02

ОПЫТ ТРЕХСТОРОННЕГО СОТРУДНИЧЕСТВА БОЛГАРСКИХ И РОССИЙСКИХ УНИВЕРСИТЕТОВ

*ПЕТРОВА М. М., доктор физ. мат наук, профессор
(Великотырновский ун - т им. Святого Кирилла и Мефодия, г. Велико – Тырново, Болгария)*

Петрова М.М. – 5003, г. Велико – Тырново, ул. "Теодосий Тырновски" № 2,
Великотырновский ун – т им. Святого Кирилла и Мефодия,
е – mail: mbox@uni-vt.bg

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы, связанные с развитием международного сотрудничества между вузами России и Болгарии. Наиболее активно реализовано сотрудничество с Вузами Кемеровской области, а именно с КузГТУ и его филиалом в городе Белово. Совместно с Великотырновским ун – том им. Святого Кирилла и Мефодия и филиалом КузГТУ выполнен проект «Интегрированный электронный сервис для граждан и бизнеса». Организованы международные научные и научно – практические конференции, изданы сборники научных трудов. Определены перспективы по развитию мобильности научно – педагогических работников и студентов в рамках международных межвузовских обменов, включающих в себя обучение студентов в зарубежных вузах, повышение квалификации и стажировки педагогических работников за рубежом.

Ключевые слова: международное сотрудничество, соглашение о сотрудничестве, Болгария, Россия, трехсторонний договор.

Международное сотрудничество вузов Болгарии и России ориентировано на развитие таких основных направлений, как заключение международных соглашений, выполнение грантов совместно с зарубежными партнерами; проведение международных научных конференций и семинаров, лекций и семинаров для студентов; совместная издательская деятельность с зарубежными издательствами.

Все эти направления активно реализуются в сотрудничестве с Вузами Кемеровской области, наиболее активно – с КузГТУ и его филиалом в городе Белово.

В рамках первого направления сотрудничества с зарубежными партнерами, направленных на разработку и реализацию совместных инновационных и научно – исследовательских проектов, в том числе и в области совершенствования технологии ведения аквакультуры, подписаны следующие документы:

- трехсторонний договор о сотрудничестве между Высшим Училищем по агробизнесу и развитию регионов, Пловдив, Болгария, филиалом КузГТУ в г. Белово и Новосибирским филиалом «Западно – Сибирского научно – исследовательского Института водных биоресурсов и аквакультуры»;

- трехсторонний договор о сотрудничестве между Высшим Училищем по агробизнесу и развитию регионов, Пловдив, Болгария, филиалом КузГТУ в г. Белово и Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Новосибирский государственный аграрный университет» («ФГБОУ ВПО «НГАУ»).

- трехсторонний договор о сотрудничестве в сфере науки и образования между Шуменским университетом им. Епископа Константина Преславского, Шумен, Болгария, филиалом КузГТУ в г. Белово, и Новосибирским филиалом Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Государственный научно – производственный центр рыбного хозяйства».

В рамках второго направления выигран Грант правительства Болгарии на выполнение в 2013 – 2015 гг. международного совместного проекта «Интегрированный электронный сервис для граждан и бизнеса» филиала КузГТУ в г. Белово с Великотырновским университетом.

Сотрудничество между вузами Болгарии и России развивалось по следующему алгоритму:

1. В 2011 г. филиал КузГТУ в г. Белове начал сотрудничать с университетом «Св. Кирилла и Мефодия», Велико Тырново, Болгария.
2. Состоялось два визита представителей ВТУ: в 2012 г. – М. М. Петрова, по приглашению филиала КузГТУ в г. Белове. Финансирование – за счет приглашающей стороны.
3. Визит официальной делегации в мае 2013 г. в г. Белово для участия в международной конференции и выполнения работ по совместному гранту. В рамках этого визита состоялась встреча делегации с Ректором КузГТУ д.т.н., Ковалевым В.А. и подписан протокол о намерениях между КузГТУ и Великотырновским университетом. Финансирование – из средств совместного гранта.
4. В 2013 г. выигран Грант правительства Болгарии на выполнение международного совместного проекта «Интегрированный электронный сервис для граждан и бизнеса» филиала КузГТУ в г. Белово с Великотырновским университетом. Совместно с ВТУ издан сборник материалов VI Международной научной конференции «Инновации в технологиях и образовании» Участники от филиала КузГТУ в г. Белово: д.б.н. Законнова Л. И., к.п.н. Долганов Д. Н., к.и.н. Верчагина И. Ю., к.т.н. Сенчура Ю.А., студенты филиала – Чувакова Татьяна, Юшкевич Татьяна.
5. Организована совместная исследовательская работа с лабораторией «Социологических и социально – психологических исследований» филиала КузГТУ в г. Белово (заведующий научно- исследовательской лабораторией к.п.н. Долганов Дмитрий Николаевич).
6. В мае 2013 г. проведены лекции и мастер – классы для студентов КузГТУ и филиала КузГТУ следующими учеными:
 - **Николай Проданов**, доцент, проректор Юридического факультета, председатель центральной выборной комиссии университета, директор Центра дополнительного образования и квалификации университета «Св. Кирилла и Св. Мефодия», Велико Тырново, Болгария
 - **Петрова Мариана Матеева**, д-р, доцент университета «Св. Кирилла и Св. Мефодия», Велико Тырново, Болгария.

Выбор темы гранта был обусловлен тем, что развитие электронных услуг и в России, и в Болгарии в последние годы является одной из приоритетных задач, сформулированной правительствами РФ и Республики Болгария. Однако развитие систем невозможно без активного участия пользователей, в связи, с чем возникают вопросы. Насколько распространены являются электронные услуги? Насколько осведомлены жители о возможности получения электронных услуг? Первые два вопроса ставят перед нами еще более важный вопрос – что является факторами, побуждающими субъекта к использованию электронных систем? Ответ на данные вопросы позволит выделить состояние общественного мнения, определить побудительные силы и дать информацию о необходимых действиях в процессе развития систем электронных услуг.

В организованном пилотном исследовании приняли участие жители Кемеровской области (г. Кемерово, г. Белово, Беловский район) в возрасте от 16 до 50 лет. Выбор города Белово и Беловского района обусловлен тем, что в Беловском районе открыт и функционирует первый в области «МБУ «Многофункциональный центр» Беловского муниципального района». Город Кемерово – административный центр Кемеровской области, в нем наиболее развита административная инфраструктура.

Результаты исследования показали, что в целом респонденты осознают и понимают возможности при использовании электронных услуг. Однако существующая мотивационная готовность использовать электронные системы, сама по себе, не достаточна для побуждения к реальному поведению и действиям. Основным метамотивационным ограничением является низкая

осведомленность о самих системах и, что еще более важно, о возможности данных систем защищать личные данные пользователей. Таким образом, повышение информированности и осведомленности населения должно осуществляться в данных проблемных направлениях, что может способствовать большей востребованности электронных систем получения государственных услуг.

Работа по данной теме завершена в 2015 г. и уже в 2016 году подана заявка на грант РФФИ (№ 17 – 57 – 18015) – Болг_а) по теме «Интегрированная информационная система для управления взаимоотношениями со студентами в их профессиональной подготовке в университетах» совместно с филиалом КузГТУ в г. Белово.

В рамках третьего направления в филиале КузГТУ в г. Белово проведено восемь Международных научных конференций, три из них в 2016 – 2017 гг.:

II Международная научно – практическая конференция «Рекультивация выработанного пространства: проблемы и перспективы» (Белово, 9 декабря 2016 г.) организована филиалом КузГТУ в г. Белово, Россия; Новосибирским филиалом ФГБНУ "Госрыбцентр" Россия; Шуменским университетом им. Епископа Константина Преславского, Шумен, Болгария, 45 участников из РФ и Болгарии.

IX Международная научная конференция «Инновации в технологиях и образовании» (г. Белово, 18 – 19 марта 2016 г.), организована филиалом КузГТУ в г. Белове совместно Университетом «Святого Кирилла и Мефодия», Велико Тырново, Болгария и Высшей школой агробизнеса и развития регионов Пловдив, Болгария. В конференции приняли участие 380 ученых из 10 государств.

X Международная научная конференция «Инновации в технологиях и образовании» (г. Белово, 18 – 19 марта 2017 г.), организована филиалом КузГТУ в г. Белове совместно с Университетом «Св. Кирилла и Мефодия», Велико Тырново, Болгария, Национальным военным университетом им. Васила Левского, Велико Тырново, Болгария, Шуменским университетом им. Епископа Константина Преславского, Шумен, Болгария В конференции приняли участие 365 ученых из 17 государств.

В рамках четвертого направления издано около 30 сборников научных трудов, индексированных в РИНЦ, например:

1. Инновации в технологиях и образовании: сб. ст. участников IX Международной научно-практической конференции «Инновации в технологиях и образовании», 18-19 марта 2016 г.: / Филиал КузГТУ в г. Белово. – Белово: Изд-во филиала КузГТУ в г. Белово, Россия; Изд-во ун-та «Св. Кирилла и Св. Мефодия», Велико Тырново, Болгария, 2016. – Ч. 1. 273 с.

2. Инновации в технологиях и образовании: сб. ст. участников IX Международной научно-практической конференции «Инновации в технологиях и образовании», 18-19 марта 2016 г.: / Филиал КузГТУ в г. Белово. – Белово: Изд-во филиала КузГТУ в г. Белово, Россия; Изд-во ун-та «Св. Кирилла и Св. Мефодия», Велико Тырново, Болгария, 2016. – Ч. 2. 321 с.

3. Инновации в технологиях и образовании: сб. ст. участников IX Международной научно-практической конференции «Инновации в технологиях и образовании», 18-19 марта 2016 г.: / Филиал КузГТУ в г. Белово. – Белово: Изд-во филиала КузГТУ в г. Белово, Россия; Изд-во ун-та «Св. Кирилла и Св. Мефодия», Велико Тырново, Болгария, 2016. – Ч. 3. 416 с.

4. Инновации в технологиях и образовании: сб. ст. участников IX Международной научно-практической конференции «Инновации в технологиях и образовании», 18-19 марта 2016 г.: / Филиал КузГТУ в г. Белово. – Белово: Изд-во филиала КузГТУ в г. Белово, Россия; Изд-во ун-та «Св. Кирилла и Св. Мефодия», Велико Тырново, Болгария, 2016. – Ч. 4. 359 с.

5. Рекультивация выработанного пространства: проблемы и перспективы: сб. ст. участников II Международная научно-практическая конференция (9 декабря 2016 г.). / Филиал КузГТУ в г. Белово. – Белово: Изд-во филиала КузГТУ в г. Белово, Россия; Изд-во Новосибирского

филиала ФГБНУ "Госрыбцентр" Россия; Изд-во Шуменского университета им. Епископа Константина Преславского, Шумен, Болгария, 2017. – 121 с.

Выводы

Таким образом, международное сотрудничество между вузами Болгарии и России активно развивается. В период 2017 – 2020 гг. планируется уделить особое внимание таким направлениям международной деятельности, как развитие мобильности научно – педагогических работников и студентов в рамках международных межвузовских обменов, включающих в себя обучение студентов в зарубежных вузах, повышение квалификации и стажировки педагогических работников за рубежом.

EXPERIENCE OF THE TRIPARTITE COOPERATION WITHIN BULGARIAN AND RUSSIAN UNIVERSITIES

Petrova M. M. Dr. of sc. in Phys. And Math., professor, The St. Cyril and St. Methodius University of Veliko Tarnovo, Veliko Tarnovo, Bulgaria, e – mail: mbox@uni-vt.bg

The St. Cyril and St. Methodius University, Veliko Tarnovo, st. "Theodosius Tarnowski" No. 2, 5003, Bulgaria

Abstract

The article is devoted to issues related to the development of international cooperation between the universities of Russia and Bulgaria. Cooperation with universities of the Kemerovo region is implemented in a greater degree. It is Kuzbass State Technical University (KuzGTU) and its branch in Belovo that actively cooperated with us. Together with The St. Cyril and St. Methodius University of Veliko Tarnovo and the branch of KuzGTU the project "Integrated electronic service for citizens and businesses" was implemented. International scientific and practical conferences have been organized and collections of scientific works are published. Prospects for the development of mobility of scientific and pedagogical workers and students have been determined within the framework of international interuniversity exchanges, which include the training of students in foreign universities, the skills upgrading and training of pedagogical workers abroad.

Keywords: international cooperation, cooperation agreement, Bulgaria, Russia, tripartite agreement.

**ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕРОДА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТВЕРДОГО
СПЛАВА WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂**

*ДВОРНИК М. И., старший научный сотрудник,
МИХАЙЛЕНКО Е. А., научный сотрудник
(ФГБУН институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия)*

Дворник М.И. – 680042 г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская 153,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
материаловедения Хабаровского научного центра
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
е – mail: Махxxx80@mail.ru

Аннотация

Исследованы механические свойства экспериментальных ультрамелкозернистых твердых сплавов WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂, полученных жидкофазным спеканием после предварительной обработки заготовок в изменяемой среде оксидов углерода (содержание СО от 0 до 85 об. %). Регулирование содержания углерода в получаемых сплавах влияет на их твердость, трещиностойкость и прочность. Определено, исследуемые в данной работе ультрамелкозернистые сплавы в отличие от описанных в литературе аналогичных сплавов, характеризуются повышенной твердостью и пониженной трещиностойкостью и прочностью.

Ключевые слова: ультрамелкозернистый твердый сплав, микроструктура, трещиностойкость, твердость, прочность.

Введение

Уменьшение диаметра карбидных зерен в микроструктуре является на данный момент одним из основных направлений улучшения свойств твердых сплавов. Спрос рынка на тонкодисперсные твердые сплавы растет, а сведения о свойствах ультрамелкозернистых сплавов недостаточны, а иногда и противоречивы [1 – 4], поэтому необходимо детальное изучение механических свойств данной группы сплавов. Перед авторами стояла цель определить зависимость механических свойств ультрамелкозернистого сплава WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂ от содержания СО в газовой смеси, применяемой для обработки твердосплавных заготовок, в результате которой восполняется потерянный из карбида вольфрама во время измельчения, хранения, транспортировки углерод. Обработка заготовок для получения ультрамелкозернистого твердого сплава WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂ в атмосфере смеси оксидов углерода разного состава (с объемным содержанием СО 0%, 35%, 65%, 72,5 %, 75 %, 77,5 и 80%) позволяет регулировать количество углерода в сплаве, а, следовательно, твердость, трещиностойкость и прочность образующихся сплавов.

Описание экспериментальных исследований

Для исследования были произведены восемь партий (по 3 образца в каждой) ультрамелкозернистого твердого сплава WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂, обработанных в газовой смеси в течении 50 минут на начальной стадии спекания при температуре 650° С. В твердосплавных стаканах при добавлении

этилового спирта в мельнице Retsch PM – 400 при 250 об/мин. смешивали нанодисперсный порошок WC Hongwu (80 – 100 нм) с кобальтом и ингибиторами роста зерен (VC и Cr₃C₂).

Соотношение масс шаров к порошку составило 10:1. Смешанный с пластификатором (2%) полученный порошок был спрессован в штабики под давлением 360 МПа и спечен в трубчатой печи Carbolite STF в вакууме. Максимальная температура и время выдержки при спекании составляла 1430° С и 1 час, что соответствовало традиционной технологии [5]. Так как содержание углерода в порошках при измельчении, хранении и спекании уменьшается, было произведено его восполнение по авторской методике [6] для того, чтобы избежать формирования η - фазы. Исследование гранулометрического состава порошков и микроструктуры образцов производили на растровом микроскопе Sigma 300 VP (в Дальневосточном центре электронной микроскопии на базе ИБМ ДВО РАН.) Размер полученных образцов (20x6,5x5,25 мм) и методика определения прочности соответствовали ИСО 3327 – 82. Диаметр кристаллитов WC (областей когерентного рассеивания) был определен по результатам рентгеноструктурного анализа, проведенного на дифрактометре ДРОН – 7 при Cu/Kα излучении с длиной волны $\lambda = 0,15406$ нм.

Результаты и обсуждения

На рис. 1 представлена структура полученного ультрамелкозернистого твердого сплава WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂ после спекания, состоящая из зерен WC, пространство между которыми заполнено кобальтом. Несмотря на применение нанодисперсного порошка с заявленным диаметром частиц 100 нм, средний диаметр зерен ультрамелкозернистого сплава составил 0,37 мкм, что объясняется ростом диаметра зерен во время перекристаллизации через жидкую фазу на последней стадии спекания. Средний диаметр кристаллитов по данным кристаллографического исследования при этом равен 0,29 нм.

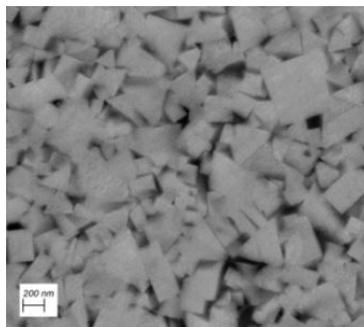


Рис.1. Структура ультрамелкозернистого сплава WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂

Полученные сплавы обладают повышенной пористостью (2,0%) из-за низкой прессуемости нанодисперсного порошка и пониженной температуры спекания (1430°С), необходимой для ограничения роста зерен. Наличие η-фазы в партиях, в которых дефицит углерода не был компенсирован в процессе создания данных партий приводит к снижению содержания жидкой фазы на основе кобальта и повышению пористости до 5 – 7 %. Включения свободного углерода, образующиеся при высокой концентрации СО, во время обработки заготовок, не отличаются от пор на микроструктуре образцов (4,6 %). Таким образом, как избыток, так и недостаток углерода в получаемых сплавах приводят к резкому снижению плотности и повышению пористости (рис.2). Наименьшей пористостью (1,5 % и 1,6 %) обладают образцы ультрамелкозернистого сплава стехиометрического состава, полученные при объемной концентрации СО 72,5 % и 75 %.



Рис. 2. Зависимости плотности (а) и пористости (б) от содержания η-фазы или углерода в ультрамелкозернистом сплаве WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂ после обработки заготовок в газовой смеси (♦) и без обработки (■)

При содержании углерода в образцах менее 5,6 % образующаяся в результате η-фаза, ухудшает механические свойства получаемого материала (рис. 3). Зависимость твердости и прочности от содержания в образце углерода имеют ярко выраженный максимум, соответствующий сплаву, полученному при обработке образцов в атмосфере CO+CO₂ с содержанием CO 72,5 об. %. При этом образуется сплав стехиометрического состава, который имеет максимальную твердость, равную HV1941, пористость - 1,6%, прочность - 1210 МПа и трещиностойкость – 8,5 МПа√м. (рис.3) При избытке углерода снижается твердость, трещиностойкость и прочность полученного сплава. Исследование показало, что изменение содержания углерода обуславливает изменение твердости от поверхности к центру образцов. Это справедливо для сплавов, обработанных в атмосфере с наибольшим и наименьшим содержанием CO.

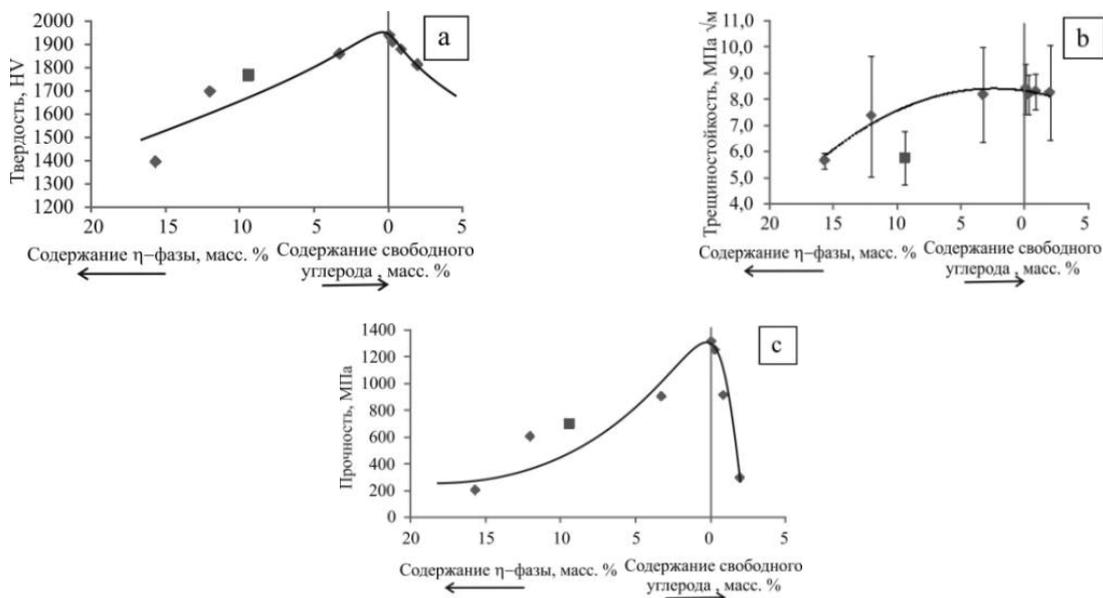


Рис. 3. Зависимости твердости (а) и трещиностойкости (б) и прочности (с) от содержания η-фазы или углерода в ультрамелкозернистом сплаве WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂

Трещиностойкость значительно снижается только для сплавов с пониженным содержанием углерода, так как образующаяся η -фаза более хрупкая, чем зерна карбида вольфрама. Спеченные в данной работе образцы со стехиометрическим составом тверже по сравнению с ультрамелкозернистыми вольфрамокобальтовыми твердыми сплавами, содержащие 8 масс. % Со и полученными иными способами (таблица).

Повышение твердости можно объяснить не только меньшим размером зерен, но и соблюдением требований к содержанию углерода. Сравнение с контрольной партией, полученной без предварительной обработки заготовок в газовой смеси, показало, что обработка пористых заготовок ультрамелкозернистого твердого сплава WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂ в атмосфере оксидов углерода (CO+CO₂), содержащей CO 72,5 об. %, позволяет восполнить недостаток углерода (0,3масс. %), возникший из-за окисления исходного нанодисперсного порошка, избавиться от η -фазы (9,4 масс. %), снизить пористость с 5,2 % до 1,6 % за счет увеличения жидкой фазы, увеличить твердость с 1767HV до 1941HV, трещиностойкость – с 5,8 МПа $\sqrt{м}$ до 8,2 МПа $\sqrt{м}$ и прочность – с 690 МПа до 1210 МПа.

Таблица

| Сплав [источник] | Метод спекания | Средний диаметр зерен WC, мкм. | Твердость HV | Трещиностойкость, МПа $\sqrt{м}$ | Прочность, МПа |
|--|--------------------------|--------------------------------|--------------|----------------------------------|----------------|
| WC-8Co-0.4VC-0.4Cr ₃ C ₂ | Жидкофазное спекание | 0,37 | 1941±76 | 8,5±2,0 | 1210±250 |
| [7] | | 0,45 | 1337 | | 280 |
| | | 0,4 | 1582 | | 490 |
| [8] | спекание под давлением | 0,4 | 1907 | 9,2 | 3137 |
| [9] | горячее прессование | 0,097 | 1600 | 7,0 | |
| [10] | электроискровое спекание | 0,42 | 1881 | 10,5 | |
| [11] | | 0,44 | 1945 | 10,8 | |
| | | 0,49 | 1610 | 11,2 | |
| | | 0,53 | 1520 | 15,2 | |
| | | индукционное спекание | 0,41 | 1923 | 10,5 |
| | 0,54 | 1650 | 11,2 | | |

Выводы

В работе определено, что на содержание углерода в твердых сплавах влияет обработка пористых прессовок на начальной стадии жидкофазного спекания при температуре 650°C в течение 50-ти минут в регулируемой по составу газовой смеси CO+CO₂. Введение этой стадии в процесс получения ультрамелкозернистого сплава WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂ позволяет получать сплавы с завышенным, заниженным содержанием углерода или приводить его в полное соответствие с химической формулой.

Образцы из контрольной партии имеют недостаток углерода до 0,3масс.%, что соответствует содержанию 15,7масс.% η-фазы, наличие которой подтверждено рентгенофазовым анализом. Уменьшение жидкой фазы при таком недостатке углерода приводит к увеличению пористости до 7,0 %, что вместе с наличием хрупкой η - фазы вызывает резкое снижение твердости (1394HV), трещиностойкости (5,6 МПа√м) и прочности (230 МПа).

Увеличение концентрации углерода до 7,6 масс. % (2,0 масс. % свободного углерода) так же привело к росту пористости до 4,6 %, снижению твердости до 1811HV, трещиностойкость – до 8,2 МПа√м и прочность – до 294 МПа.

При содержании углерода 5,6 масс. % получается стехиометрический ультрамелькодисперсный сплав, который обладает повышенной твердостью, пониженной трещиностойкостью и пониженной прочностью. То есть его механические свойства не соответствуют предсказанным в литературе свойствам подобных сплавов (высокая прочность и трещиностойкость, низкая твердость). Повышенная их твердость гарантирует высокую износостойкость. Трещиностойкость и прочность спеченных в данной работе ультрамелькодисперсных твердых сплавов WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂ позволяют использовать их для чистового резания особотвердых и абразивных материалов.

Список литературы

1. Zhi-Hui Xu, John Agren. A modified hardness model for WC–Co cemented carbides. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 386 , p. 262 – 268.
2. H. Engqvist, S. Jacobson, N. Axen. A model for the hardness of cemented carbides. *Wear*, 2002, vol. 252, p. 384 – 393
3. L. Makhele –Lecala, S Luiyckx, F.R.N. Nabarro. Semi-empirical relationship between hardness, grain size and mean free path of WC-Co. . *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2001, vol. 19, p. 245 – 249
4. Seung I. Cha, Kyong H. Lee, HoJ.Ryu, Soon H. Hong. Analytical modeling to calculate the hardness of ultra-fine WC–Co cemented carbides. *Materials Science and Engineering A*, 2008, vol 489, p. 234–244.
5. В. С. Панов, А. А. Зайцев Тенденции развития технологии ультрадисперсных и наноразмерных твердых сплавов WC–Co. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия* – 2014, № 3, с. 38 – 4
6. Дворник М.И., Зайцев А.В., Ершова Т.Б. Повышение прочности и твердости субмикронного твердого сплава WC-8%Co-1%Cr₃C₂ за счет докарбидизации в процессе спекания // *Вопросы материаловедения* - 2011 - № 4(68) - с. 81 – 88.
7. А.С. Курлов, А.А. Ремпель, А. Leenaers, S. Van Der Bergh. Прочность на изгиб и микротвердость твердых сплавов WC-8%Co на основе порошков разной дисперсности. *Материаловедение* № 4, 2009, с. 18 – 21.
8. .W. Friederichs. Patent US5368628. Articles of ultrafine grained cemented carbide.
9. M. Sherif El-Eskandarany , Amir A. Mahday, H.A. Ahmed , A.H. Amer. Synthesis and characterizations of ball-milled nanocrystalline WC and nanocomposite WC–Co powders and subsequent consolidations. *Journal of Alloys and Compounds* 312 (2000) 315 – 325
10. Hwan-Cheol Kim, In-Jin Shon, Jin-Kook Yoon, Jung-Mann Doh. Consolidation of ultra fine WC and WC–Co hard materials by pulsed current activated sintering and its mechanical properties. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2007, Volume 25, Issue 1, p. 46 – 52.
11. Hwan Cheol Kim, In Kyoon Jeong, In Jin Shon, In Yong Ko, Jung Mann Doh. Fabrication of WC–8 wt.%Co hard materials by two rapid sintering processes. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2007, Volume 25, Issue 4, p. 336 – 340.

**INFLUENCE OF CARBON CONCENTRATION ON THE MECHANICAL
PROPERTIES ULTRAFINE HARD ALLOY WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂**

Dvornik M.I., Senior researcher, e – mail: Maxxxx80@mail.ru

Mikhaylenko E.A. Research, e – mail: assistantmea80@list.ru

Institute of Materials of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 153 Tichookeanskaya st., Khabarovsk, 680042, Russia.

Abstract

The mechanical properties of experimental ultrafine WC-8Co-0.4VC-0.4Cr₃C₂ hard alloys, obtained by liquid phase sintering after preliminary processing of blanks by variable environment, carbon oxides (CO content of 0 to 85 volume percent). The carbon content regulation in the obtained alloys affects their hardness, fracture toughness and strength.

Eight batches of ultrafine hard alloy with a different carbon content obtained in this study. The mechanical properties of these alloys were studied. Carbon deficiency leads to the formation of alloys with porosity, hardness, fracture toughness, and strength equal to 7%, 1394HV, 5,6MPa√m, 230 MPa, respectively. Porosity, hardness, fracture toughness and strength of the alloys with excess carbon equal to 4.6%, 1811HV, 8.2 MPa√m, 294 MPa, respectively.

The carbon concentration of 5.6 wt.% characterizes the alloys of stoichiometric composition. These alloys have good mechanical properties. The porosity of this alloy equal to 1.6%, the hardness equal to 1941HV, fracture toughness equal to 8.2 MPa√m, strength equal to 1210 MPa. Determined, investigated in this work ultrafine hard alloys are characterized by high hardness and low fracture toughness and strength compared to similar alloys. Finish cutting extra hard and abrasive materials is application area of these alloys.

Keywords: ultrafine hard alloy, microstructure, fracture toughness, hardness, strength.

ПОЛУЧЕНИЕ СТЕКЛОПЛАСТИКА ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ

*ЕРЕНКОВ О. Ю., доктор техн. наук,
ЧИРКУН В. Н., магистрант
(Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия)*

Еренков О. Ю. – 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136,
Тихоокеанский государственный университет,
е – mail: erenkov@list.ru

Аннотация

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния электрофизической обработки полимерного связующего непосредственно в пресс-форме на механические характеристики стеклопластика. Доказано, что электрофизическая обработка полимерного связующего непосредственно в форме путем совместного действия наносекундными электромагнитными импульсами и электрически переменным полем позволяет получать материал с более высокими, до 15%, прочностными показателями и способствует совершенствованию технологии производства полимерных композиционных материалов за счет обеспечения непрерывности технологического процесса. Методом растровой электронной микроскопии установлена трансформация надмолекулярной структуры полимерного связующего от сферолитной к фибриллярной, что приводит к образованию пространственной структуры и способствует повышению ряда физико-механических свойств конечного продукта – стеклопластика.

Ключевые слова: стеклопластик, полимерное связующее, надмолекулярная структура, наносекундные электромагнитные импульсы, электромагнитное поле, механические свойства.

Введение

Как известно, одной из насущных задач при производстве полимерных композиционных материалов (ПКМ) является производство материалов с повышенными физико-механическими показателями.

Одним из путей решения данной задачи может быть осуществление модификации полимерного связующего. На современном этапе развития науки о ПКМ существует большое многообразие методов модификации эпоксидного связующего [1 – 3]. На основании анализа научно-технической информации, и с учетом оценки технологичности, экономической и экологической целесообразности известных методов модификации можно обосновано выдвинуть предположение о том, что одним из эффективных способов модификации полимерных связующих явиться электрофизическая обработка, т.е. обработка физическими полями, в том числе электромагнитными волнами и импульсами [4, 5]. Данное предположение в полной мере экспериментально подтверждено результатами проведенных исследований механических свойств стеклопластика [6, 7]: доказано экспериментально, что применение предварительной электрофизической обработки полимерного связующего путем совместного воздействия наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) и электромагнитным переменным полем (ЭМП) в течении 25 минут приводит к повышению прочностных свойств изделий из стеклопластика Этал Т 210-Т11-ГВС9 от 1,4 до 1,7 раз.

Экспериментальные исследования

На данной стадии экспериментов электрофизическая обработка полимерного связующего осуществлялась, в отличие от предыдущих исследований [6, 7], непосредственно в форме для изготовления лопатки рабочего колеса центробежной компрессорной установки, т.е. без прерывания технологического процесса. Схема и фотография экспериментальной установки представлена на рис. 1. Параметры электрофизической обработки связующего поддерживались такими же как в работе [7].

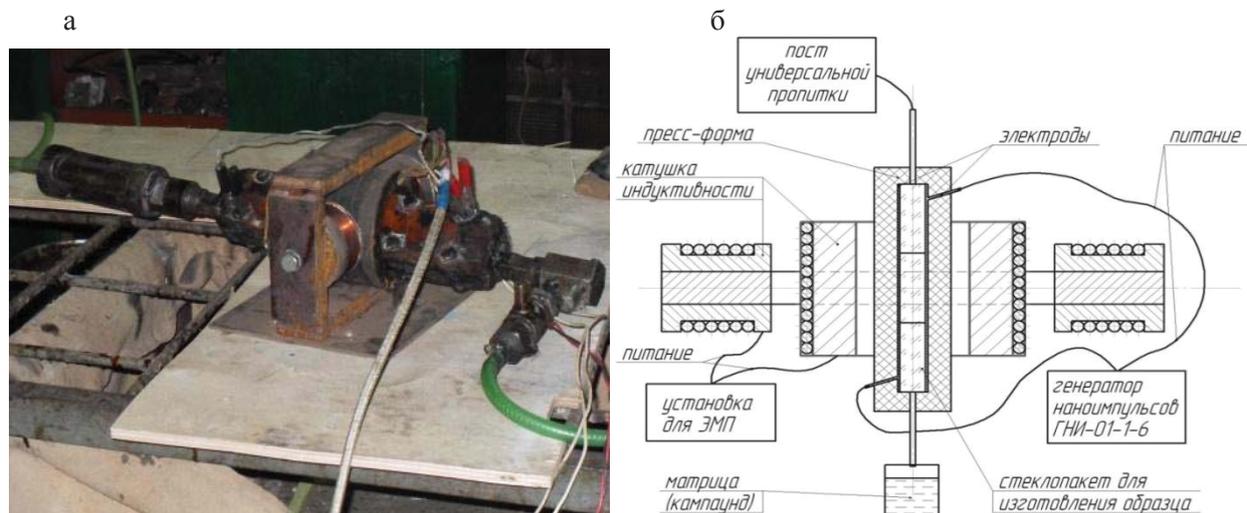


Рис. 1. Схема и общий вид экспериментальной установки

Цель исследования – установить характер изменения механических свойств стеклопластика в зависимости от времени обработки полимерного связующего непосредственно во время технологического процесса формования детали, а также оценить эффективность такого технического решения по сравнению с предварительной обработкой полимерного связующего.

На рис. 2 – 5 представлены экспериментальные данные позволяющие оценить взаимосвязь между видом и временем электрофизического воздействия на эпоксидное связующее Этал Т 210 и механическими характеристиками образцов из стеклопластика Этал Т 210 – Т11 – ГВС9.

Анализ полученных данных позволяет заключить, что совместная обработка НЭМИ и ЭМП (кривая 3 на рис. 2 – 5) полимерного связующего непосредственно в форме позволяет повысить качество готового стеклопластика, о чем свидетельствуют более высокие значения механических характеристик материала по сравнению с базовыми значениями и полученными при индивидуальных обработках НЭМИ (кривая 1, рис.2 – 5) и ЭМП (кривая 2, рис.2 – 5). Максимальные приращения значений механических характеристик стеклопластика происходят после совместной обработки НЭМИ и ЭМП полимерного связующего в течение 25 минут, а именно:

- $\sigma_{сж}$ возрастает от 415 МПа до 455 МПа при 25 минутной обработке, т.е. повышается предел прочности при сжатии на 9,8 %;
- $\sigma_{в}$ увеличивается от 510 МПа до 550 МПа при 25 минутной обработке, т.е. повышается предел прочности при растяжении на 7,3 %;
- $\sigma_{изг}$ возрастает от 715 МПа до 765 МПа при 25 минутной обработке, т.е. повышается предел прочности при изгибе на 7,5 %;

- a_n возрастает от 325 кДж/м² до 360 кДж/м² при 25 минутной обработке, т.е. ударная вязкость повышается на 9,8 %

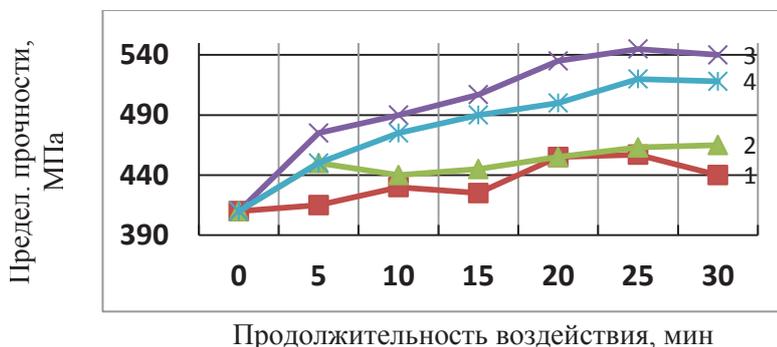


Рис.2. Прочность при растяжении стеклопластика:

1 – воздействие НЭМИ; 2 – воздействие ЭМП; 3 – совместное воздействие НЭМИ и ЭМП;
4 – предварительное совместное воздействие НЭМИ и ЭМП

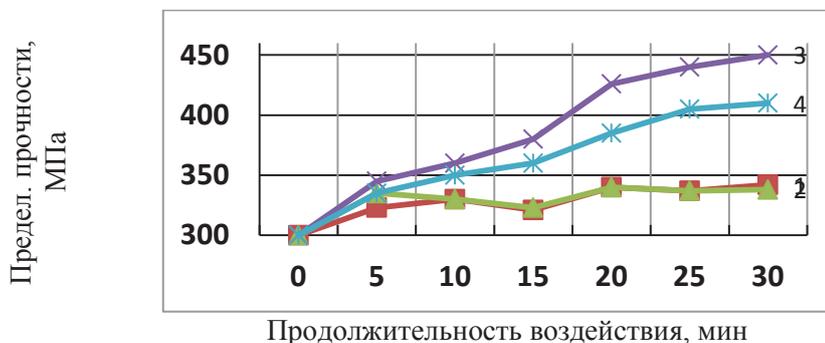


Рис.3. Прочность при статическом сжатии стеклопластика:

1 – воздействие НЭМИ; 2 – воздействие ЭМП; 3 – совместное воздействие НЭМИ и ЭМП;
4 – предварительное совместное воздействие НЭМИ и ЭМП

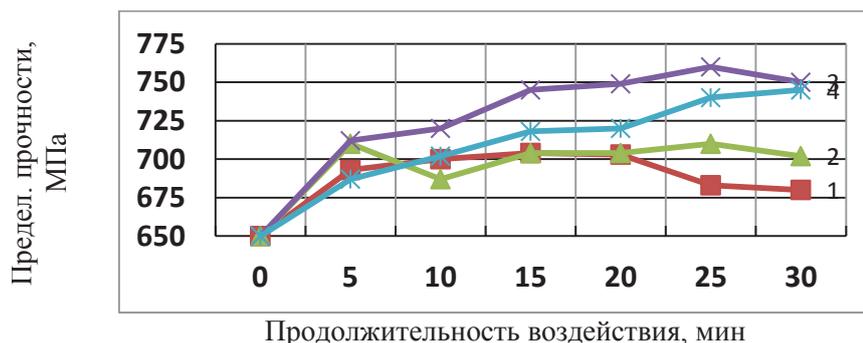


Рис.4. Прочность при статическом изгибе стеклопластика:

1 – воздействие НЭМИ; 2 – воздействие ЭМП; 3 – совместное воздействие НЭМИ и ЭМП;
4 – предварительное совместное воздействие НЭМИ и ЭМП

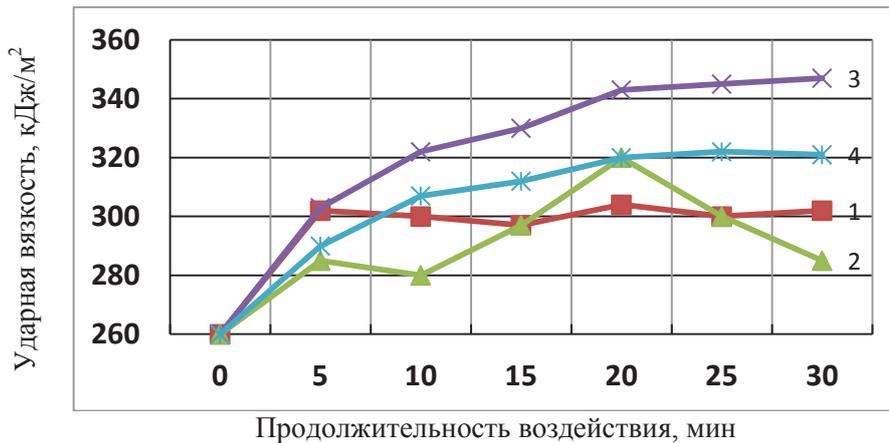


Рис. 5. Ударная вязкость стеклопластика :

1 – воздействие НЭМИ; 2 – воздействие ЭМП; 3 – совместное воздействие НЭМИ и ЭМП;
4 – предварительное совместное воздействие НЭМИ и ЭМП

Для проведения сравнительного анализа эффективности предложенного технического решения по обработке полимерного связующего непосредственно во время формования детали на рис. 2 – 5 представлены данные (кривая 4) по влиянию совместной обработки связующего НЭМИ и ЭМП предварительно операции формования, полученные ранее [6]. На основании сопоставления представленных данных можно сделать заключение о том, что электрофизическая обработка полимерного связующего непосредственно в форме способствует совершенствованию технологии производства ПКМ, так реализация такого подхода позволяет получать материал с более высокими прочностными показателями и осуществлять процесс формования деталей и изделий непрерывным образом, т.е. повысить производительность технологического процесса в целом.

Микроструктурные исследования

В работе проводились микроструктурные исследования образцов отвержденного полимерного связующего с целью определения характера изменения надмолекулярной структуры полимера после его электрофизической обработки совместно НЭМИ и ЭМП. Данные исследования проводилось с помощью растрового электронного микроскопа марки JSM-6480 (фирма JEOL, Япония).

На рис.6, а, представлены микрофотографии необработанного образца. Видно, что структура образца сферолитная, сферолиты размером от 2 – 6 мкм по длине и от 2 – 5 мкм по ширине, сколы рельефные, что свидетельствует о хрупком разрушении образцов. После электрофизической обработки НЭМИ и ЭМП в течение 25 минут надмолекулярная структура композитов, рис.6, б, значительно меняется. В первую очередь это отражается на механизме разрушения образцов, которое происходит по пластическому механизму, т.к. сколы отличаются сглаженными границами разрушения. Во-вторых, наблюдается еще более выраженная анизотропия роста надмолекулярных образований, которые представляют собой больше фибриллярную структуру, чем сферолитную, несмотря на наличие центров кристаллизации по сферолитному типу.

Таким образом, электрофизическая обработка полимерного связующего, находящегося непосредственно в пресс-форме совместным воздействием НЭМИ и ЭМП привела к тому, что в образцах происходит переориентация сферолитных образований в фибриллярные.

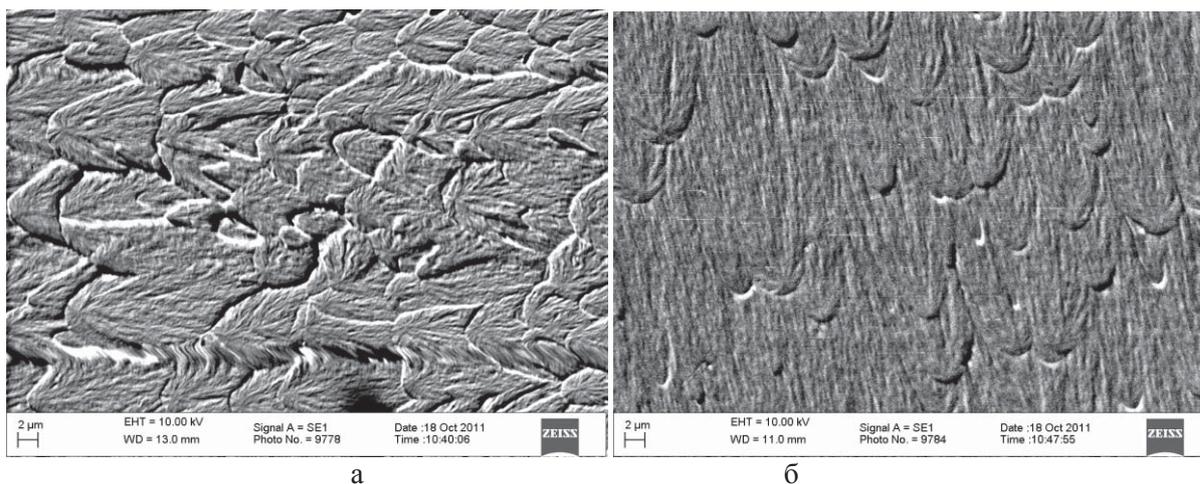


Рис. 6. Надмолекулярная структура полимерного связующего:
а – до электрофизической обработки; б – после совместной обработки НЭМИ и ЭМП в течение 25 минут

Обсуждение результатов

Эффект влияния предварительного воздействия НЭМИ и ЭМП, как индивидуальных, так и совместного предлагается объяснить следующим образом.

Согласно с дырочной концепцией жидкого состояния Я.И. Френкеля [8] частицы жидкости находятся в гармоническом колебании около некоторого положения равновесия, а через некоторый промежуток времени τ атом может перескочить в новое положение равновесия, расположенное на близком к межатомному расстоянию.

Воздействие НЭМИ на полимерное связующее в жидкой фазе, очевидно, способно увеличить количество атомов, обладающих избыточной энергией, необходимой для совершения акта перехода частицы из одного положения равновесия в другое. Такой переход, как известно [8 – 10], вызывает разрыв химических связей. При этом разрыв связей обычно сопровождается образованием на их концах радикалов, обладающих высокой реакционной способностью, что является причиной последующего восстановления разорванных химических связей. Учитывая малую длительность одного импульса, составляющую 1нс , можно предположить, что вероятности процессов разрыва связей и их восстановления будет примерно одинакова, т.е. в некоторых случаях равновесие между актами разрыва связей и актами их восстановления несколько смещается в сторону преобладания актов разрыва, а в других случаях – в сторону преобладания актов восстановления. Таким образом, индивидуальное воздействие НЭМИ, при установленных параметрах, на эпоксидный олигомер в жидком состоянии не приводит к значительным изменениям его структуры и, соответственно, механических характеристик получаемого впоследствии стеклопластика.

Индивидуальное воздействие ЭМП на исследуемый эпоксидный олигомер Этал Т 210 в жидком состоянии приводит к образованию в его объеме пондеромоторных сил, т.е. сил давления электромагнитных волн на помещенную в электромагнитное поле вещество. Механизмы возникновения и действия данных сил подробно исследованы и представлены в известном труде Ландау Л.Д. [11]. Под действием пондеромоторных сил происходит упругое деформирование основных полимерных цепей связующего, что связано с изменением в макромолекулах межатомных расстояний и валентных углов, а также – с изменением межмолекулярных расстояний, за счет преодоления межмолекулярных Ван-дер-ваальсовых сил упругости.

Таким образом, должно иметь место изменения формы макромолекул связующего, т.е. изменение их конформаций. В работах Аскадского А.А. и Тагера А.А. [9, 10] отмечено, что конформационные превращения макромолекул не сопровождаются разрывом химических связей. Следовательно, можно заключить, что индивидуальное воздействие ЭМП, при установленных параметрах, на эпоксидный олигомер в жидком состоянии не приводит к значительным изменениям его структуры и, соответственно, механических характеристик получаемого впоследствии стеклопластика.

При комбинированном воздействии НЭМИ и ЭМП одновременно имеют место, по всей вероятности, эффекты описанные выше. Изменение конформации макромолекул с большой вероятностью позволит обеспечить интенсивное взаимодействие образующихся во время обработки НЭМИ активных радикалов и концевых групп друг с другом, образуя поперечные химические связи между макромолекулами. Это должно привести к образованию, возможно частично, пространственной структуры полимерного связующего на данной стадии производства стеклопластика. Возможность протекания реакции сшивания в полимерах до проведения технологической операции отверждения установлена, например, исследованиями Тагера А.А. [10]. При последующем отверждении связующего происходит, возможно, окончательное формирование пространственной структуры полимерного связующего. Образование пространственной структуры способствует повышению ряда физико-механических свойств конечного продукта – стеклопластика, что и подтверждается результатами экспериментальных исследований [7].

На основании вышеизложенного и предположении о том, что электронное возбуждение полимерной структуры может быть вызвано также воздействием наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ) и электромагнитного поля (ЭМП) в данной работе представлен новый способ формования изделий из эпоксидной [12]. Разработанный способ относится к технологии переработки полимерных композиционных материалов и может быть использован для изготовления изделий на основе связующего из эпоксидной смолы, например, рабочих колес машин типа центробежного нагнетателя воздуха.

Выводы

Экспериментальным путем доказано, что электрофизическая обработка полимерного связующего непосредственно в форме путем совместного действия наносекундными электромагнитными импульсами и электрически переменным полем способствует совершенствованию технологии производства ПКМ, так реализация такого подхода позволяет получать материал с более высокими, до 15%, прочностными показателями по сравнению с вариантом предварительной обработки, и осуществлять процесс формования деталей и изделий непрерывным образом, т.е. повысить производительность технологического процесса в целом.

Установлена, методом растровой электронной микроскопии, трансформация надмолекулярной структуры полимерного связующего от сферолитной к фибриллярной после его совместной обработки наносекундными электромагнитными импульсами и электромагнитным полем. Трансформация надмолекулярной структуры полимерного связующего приводит к образованию пространственной структуры, что способствует повышению ряда физико-механических свойств конечного продукта – стеклопластика.

Список литературы

1. Кулезнев В.Н. Химия и физика полимеров / В.Н. Кулезнев, В.А. Шершнева. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 2007. - 367 с.
2. Зеленев Ю.В. Прогнозирование изменения физических свойств полимерных материалов при разных способах их модификации/ Ю.В. Зеленев, В.И. Хромов.// Пластические массы.- № 11. 2002.
3. Кестельман В.Н. Термомагнитная обработка полимерных композиционных материалов/ В.Н. Кестельман, А.Д. Стадник.- М.: НИИ- ТЭХИМ. -1989.
4. Бартнев Г.М. Курс физики полимеров/ Г.М. Бартнев, Ю.В. Зеленев.- Л.: Химия, 1976.
5. Арьев А.М. Термоэлектрическая модификация полимерных материалов/ А.М. Арьев, Ю.В. Зеленев.// Наука и технология в России. – 1995. №9. с. 13.
6. Еренков О.Ю., Игумнов П.В., Никишечкин В.Л. Исследование механических свойств полимерных композитных материалов// Вестник машиностроения.2010.№4. С.61-63.
7. Еренков О.Ю., Никишечкин В.Л. Исследование эффективности влияния предварительной электрофизической обработки связующего на прочностные характеристики ПКМ// Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.- 2010.- № I-1 (2).-С. 99-104.
8. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей / Я.И. Френкель.- Л.: Наука, 1975.
9. Аскадский А. А. Деформация полимеров / А.А. Аскадский. - М.: Химия, 1973. 448 с.
10. Тагер А.А. Физикохимия полимеров./ А.А. Тагер.- М.: «Химия».- 1978.- 544 с.
11. Ландау Л. Д. Электродинамика сплошных сред/ Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.- М.: Физматгиз, 1959. 532 с.
12. Патент №2422273 Российская федерация, (51) МПК В29С 41/04. Способ формования изделий из эпоксидной смолы/ Еренков О.Ю., Игумнов В.П., Игумнов П.В., Никишечкин В. Л. ,Богачев А.П.– Заявка № 2009145870/05; заявлено 10.12.2009; опубликовано27.06.2011, Бюл. №18.

PRODUCTION OF HIGH STRENGTH FIBERGLASS

Erenkov O.Yu., D.Sc. (Engineering) professor, e – mail: erenkov@list.ru

Chirkun V.N., master's, Degree, e – mail: erenkov@list.ru

Pacific National University, 136 Tikhooceanskaya st., Khabarovsk, 680035, Russia.

Abstract

The results of experimental studies of the effect of polymer binder electro physical treatment directly in the mold on the mechanical characteristics of fiberglass are presented. It is proved that the electro physical treatment of polymer binder directly in the form by the joint action of nanosecond electromagnetic pulses and electrically alternating field allows to obtain a material with a higher strength characteristics and contributes to the improvement of production technology of polymer composite materials due to the continuity of the technological process. On the base of electron microscopy installed the supramolecular structure of polymer binder transformation from spherulitic to fibrillar after his joint processing of nanosecond electromagnetic pulses and electromagnetic field. Transformation of the supramolecular structure of polymer binder leads to the formation of the spatial structure, thereby increasing the number of physical and mechanical properties of the final product.

Keywords: fiberglass, polymer binder, supermolecular structure, nanosecond electromagnetic pulses, electro-magnetic field, mechanical properties.

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА ПУТЕМ ВИБРАЦИОННОЙ
ОБРАБОТКИ ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО**

*ЕРЕНКОВ О. Ю., доктор техн. наук,
УЗИНСКАЯ Д. Д., магистрант
(Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия)*

Еренков О. Ю. – 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136,
Тихоокеанский государственный университет,
е – mail: erenkov@list.ru

Аннотация

Цель работы – исследование взаимосвязи между прочностными свойствами деталей из стеклопластика, изготавливаемые методом вакуумно – компрессионной пропитки, и видом и параметрами предварительных электрофизических воздействий на эпоксидное связующее. Установлено, что наиболее оптимальным режимом вибрационной обработки жидкого полимерного связующего является частота колебаний 100 Гц при амплитуде колебаний 60 мкм, так как при реализации именно такого режима виброобработки связующего наблюдаются максимальные значения исследуемых прочностных показателей изготавливаемого стеклопластика.

Ключевые слова: стеклопластик, полимерное связующее, надмолекулярная структура, амплитуда колебаний, частота колебаний, механические свойства

Введение

Благодаря особым свойствам, присущим только пластическим массам, применение их в машиностроении открывает широкие конструктивно – технологические возможности для создания машин и аппаратов на более высоком техническом уровне. Многие пластмассы, являясь самостоятельными конструкционными материалами, с большим успехом вытесняют как цветные, так и черные металлы.

При этом особого внимания заслуживают стеклопластики, которые представляют собой терморезистивную пластмассу, состоящую из синтетической смолы со стекловолокнистым наполнителем. Высокая удельная прочность в сочетании с хорошей химической стойкостью по отношению ко многим агрессивным средам открывает возможности использования стеклопластиков в различных отраслях промышленности и, в частности, в центробежных компрессорных машинах, обслуживающих различные химические производства [1].

Несмотря на многообразие способов получения деталей и изделий из стеклопластиков, применение их в качестве конструкционного материала часто ограничивается достигнутым уровнем их прочностных свойств, которые, в свою очередь, лимитируются несовершенством технологического процесса и нестабильностью свойств полимерных связующих. Очень часто имеют место механические повреждения деталей наиболее нагруженных узлов энергетических машин, таких как рабочие лопатки, диски и т.д. Таким образом, задача повышения прочностных свойств стеклопластиков, в том числе за счет новых технологических решений, является актуальной.

Рассмотрим решение поставленной задачи на основе структурной модификации полимерного связующего путем его предварительной вибрационной обработки перед операцией пропитки наполнителя.

Цель работы - исследование взаимосвязи между прочностными свойствами деталей из стеклопластика, изготавливаемые методом вакуумно-компрессионной пропитки, и видом и параметрами предварительных электрофизических воздействий на эпоксидное связующее.

Методика проведения исследований

В качестве материала для изготовления экспериментальных образцов использовано полимерное связующее Этал Т 210, наполнитель — стеклоткань Т11, замасливатель — ГВС9. Были изготовлены образцы стеклопластика типа Этал Т 210 – Т11 – ГВС9 с помощью установки вакуумно – компрессионной пропитки и печи сопротивления для термообработки материала, установленной на ОАО «Дальэнергомаш» (г. Хабаровск) [2, 3].

Образцы связующего и стеклопластика в виде пластин и лопаток подвергались исследованиям в соответствии с ГОСТ 4648 – 71 и ГОСТ 11262 – 80: испытания образцов связующего с целью определения напряжений сжатия, растяжения, изгибающих напряжений, прочности при межслойном сдвиге, ударной вязкости и твердости как после электрофизического воздействия, так и без него; испытания образцов стеклопластика с целью определения напряжений растяжения, изгибающих напряжений, прочности при межслойном сдвиге, ударной вязкости и твердости как после электрофизического воздействия, так и без него. Определение параметров, характеризующих механические свойства исследуемого материала, проводили на испытательных машинах моделей УММ-20, МК-30А, ТБ 5004. Качество обработанной резанием поверхности деталей из исследуемого материала контролировали при помощи профилометра ТК 200 (США). Оценивались основные параметры шероховатости согласно ГОСТ 2789 – 73 и международному стандарту 180 4288. Токарную обработку проводили на токарном патронно-центровом станке с ЧПУ модели РТ755Ф311, а разрезку — абразивным кругом. Контроль изменения плотности полимерного связующего производили при помощи дефектоскопа ультразвукового УД2-12 общего назначения по ГОСТ 2304Э – 84. Изменение плотности оценивалось по изменению отношения входных амплитуд сигналов.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились в несколько этапов. На первом этапе выполнен базовый эксперимент, цель которого — определение механических свойств исходного материала при стандартных условиях, т.е. без применения предварительного воздействия на обрабатываемый материал. *На втором этапе* проведены экспериментальные исследования изменения плотности отвержденных образцов полимерного связующего в зависимости от режимов виброобработки связующего в жидком состоянии. *Третий этап посвящен* экспериментальному определению взаимосвязи между режимом виброактивации перед отверждением жидкого эпоксидного связующего и прочностными показателями стеклопластика.

Вибрационную обработку полимерного связующего производили с помощью механического вибратора, конструктивное исполнение которого позволяло реализовывать колебания частотой 50 и 100 Гц, амплитуда колебаний варьировалась от 2 до 60 мкм.

На рис. 1 представлены экспериментальные данные, анализ которых позволяет сделать вывод о том, что вибрационная обработка жидкого полимерного связующего приводит к изменениям его структуры. Об этом свидетельствует факт изменения плотности образцов из связующего, при этом с увеличением времени виброактивации происходит повышение его плотности. Характер повышения явно имеет экспоненциальный характер, а оптимальное время виброактивации составляет 5 мин.

Таким образом, можно предположить, что наиболее оптимальным режимом виброактивации, из исследуемых в данной работе, является следующий: частота колебаний 100 Гц, амплитуда колебаний 60 мкм.

Повышение плотности полимерного связующего под действием механических колебаний происходит, по-видимому, за счет дегазации массы связующего и более равномерного распределения отвердителя в объеме эпоксидного олигомера.

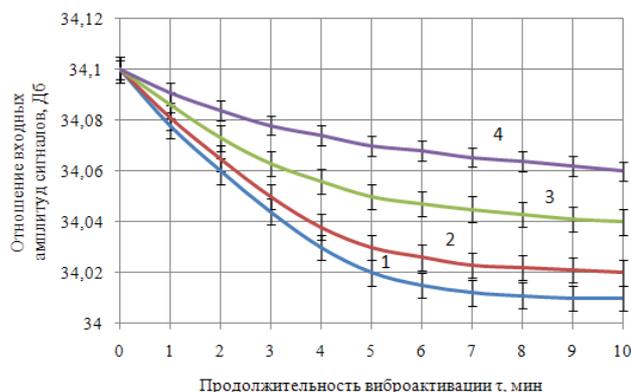


Рис. 1. Плотность образцов отвержденного полимерного связующего:
 1 – $f = 100$ Гц, $A = 60$ мкм; 2 – $f = 100$ Гц, $A = 20$ мкм; 3 – $f = 50$ Гц, $A = 60$ мкм;
 4 – $f = 50$ Гц, $A = 20$ мкм

Оценить взаимосвязь между режимом виброактивации жидкого эпоксидного связующего (перед отверждением) и пределом прочности стеклопластика при статическом изгибе можно с помощью графически представленных данных, рис. 2. В случае реализации указанных режимов виброактивации связующего наблюдается изначально рост предела прочности стеклопластика при изгибе, а затем, при превышении 5 мин виброобработки, либо некоторое снижение прочности, либо сохранение постоянного ее значения.

Анализ полученных на данном этапе исследований экспериментальных данных позволяет подтвердить предположение: наиболее оптимальный режим виброактивации из исследуемых в данной работе — частота колебаний 100 Гц, амплитуда колебаний 60 мкм. Именно при реализации данного режима обеспечивается максимальное значение предела прочности при изгибе стеклопластика в случае предварительной виброобработки связующего в течение 5 мин.

На рис. 3 графически представлены экспериментальные данные, позволяющие оценить взаимосвязь между режимом виброактивации перед отверждением жидкого эпоксидного связующего и ударной вязкостью стеклопластика. В случае реализации указанных режимов виброактивации связующего наблюдается изначально рост ударной вязкости стеклопластика при изгибе, а затем, при превышении 5 мин виброобработки, либо некоторое снижение ударной вязкости, либо сохранение постоянного ее значения.

Результаты сравнительного анализа полученных на данном этапе исследований экспериментальных данных – прямое подтверждение предположения, что оптимальный режим виброактивации из исследуемых в данной работе — частота колебаний 100 Гц, амплитуда колебаний 60 мкм. Именно при реализации данного режима обеспечивается максимальное значение ударной вязкости стеклопластика в случае предварительной виброобработки связующего в течение 5 мин.

Повышение прочностных показателей стеклопластика можно объяснить следующим образом. Виброобработка связующего приводит к образованию более плотной и равномерной его структуры, обеспечивающей повышение степени равномерности пропитки наполнителя в виде стеклоткани полимерным связующим и, соответственно, усиление адгезии на границе раздела фаз «наполнитель – связующее».

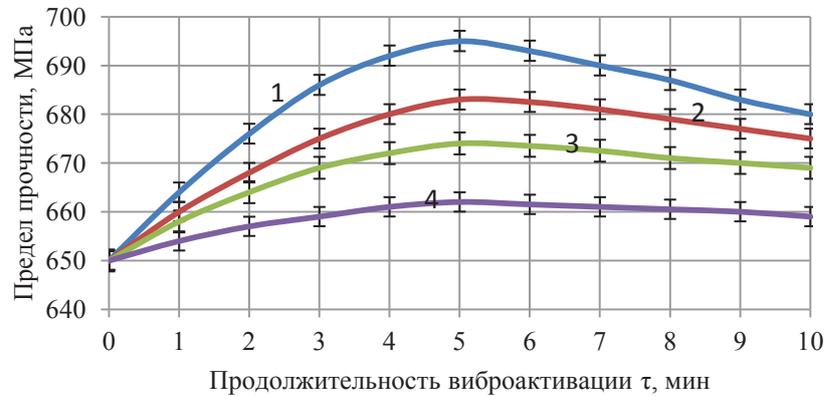


Рис. 2. Предел прочности при статическом изгибе образцов из стеклопластика: 1 – $f = 100$ Гц, $A = 60$ мкм; 2 – $f = 100$ Гц, $A = 20$ мкм; 3 – $f = 50$ Гц, $A = 60$ мкм; 4 – $f = 50$ Гц, $A = 20$ мкм

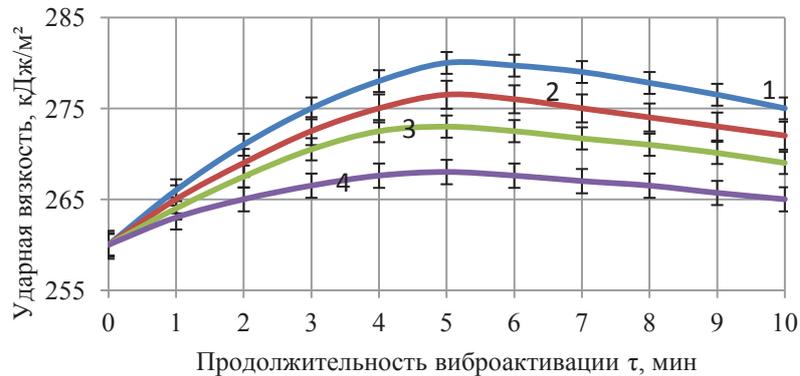


Рис. 3. Ударная вязкость образцов из стеклопластика: 1 – $f = 100$ Гц, $A = 60$ мкм; 2 – $f = 100$ Гц, $A = 20$ мкм; 3 – $f = 50$ Гц, $A = 60$ мкм; 4 – $f = 50$ Гц, $A = 20$ мкм

В данной работе проводились экспериментальные исследования эффективности механической обработки стеклопластика Этал Т 210 – Т11 – ГВС9, полимерное связующее которого было предварительно обработано посредством механических колебаний частотой 100 Гц при амплитуде колебаний 60 мкм в течение 5 мин. Осуществлялись следующие виды механической обработки полученных впоследствии образцов: точение, разрезка. Основное требование, предъявляемое к указанным операциям – обеспечение минимального уровня шероховатости обработанной поверхности.

На рис. 4 представлены профилограммы обработанных точением поверхностей деталей из стеклопластика, а в табл. сведены численные значения отдельных параметров шероховатости для случаев точения и резки заготовок из исследуемого материала.

Анализ данных (см. рис. 4, а, б и табл.) позволяет сделать заключение о том, что механическая обработка стеклопластика Этал Т 210 – Т11 – ГВС9, выполненного из предварительно обработанного посредством механических колебаний связующего, обеспечивает получение более качественно обработанной поверхности. Об этом свидетельствует экспериментально установленный факт снижения параметров шероховатости обработанной поверхности модифицированного стеклопластика до 2 раз по сравнению с поверхностью стандартного материала

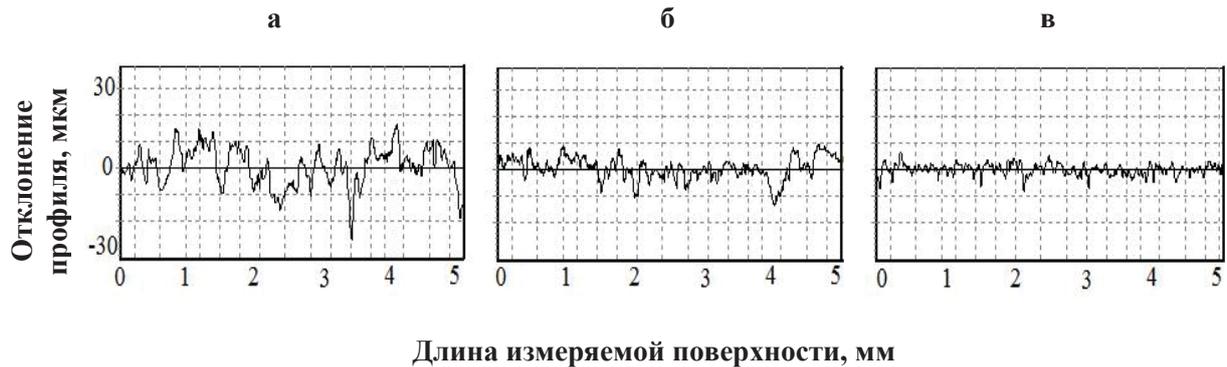


Рис. 4. Профилограммы обработанных точением поверхностей деталей из стеклопластика: а – без предварительной виброобработки связующего; б – виброобработка связующего (50 Гц, 20 мкм); в – виброобработка связующего (100 Гц, 60 мкм)

Выводы

Таким образом, на основании анализа полученных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. Доказан экспериментально факт изменения структуры полимерного связующего после предварительной его вибрационной обработки (перед отверждением), о чем свидетельствуют результаты исследования плотности образцов из связующего, а также установлены характер такого изменения и оптимальное время виброактивации, составляющее 5 мин.
2. Установлено, что наиболее оптимальным режимом вибрационной обработки жидкого полимерного связующего является частота колебаний 100 Гц при амплитуде колебаний 60 мкм, так как при реализации именно такого режима виброобработки связующего наблюдаются максимальные значения исследуемых прочностных показателей изготавливаемого стеклопластика.
3. Обработка стеклопластика Этал Т 210 – Т11 – ГВС9, выполненного из предварительно виброактивированного связующего, обеспечивает получение более высокого качества поверхности, что подтверждается фактом снижения параметров шероховатости обработанной поверхности модифицированного стеклопластика до 2 раз по сравнению с поверхностью стандартного материала.

Результаты исследования шероховатости поверхности деталей из стеклопластика
при различных видах обработки

| Вариант точения | Параметры шероховатости, мкм | | | | | | |
|---|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Ra | Rz | Rmax | Rp | Rm | Sm | Sk |
| | Точение | | | | | | |
| Обычное точение | 12,61 | 32,72 | 30,97 | 14,02 | 21,95 | 0,337 | 0,976 |
| С предварительной вибро- обработкой связующего (100 Гц, 60 мкм) | 7,505 | 15,24 | 20,75 | 9,232 | 11,52 | 0,186 | 0,600 |
| | Разрезка | | | | | | |
| Обычное точение | 18,7 | 40,20 | 37,90 | 11,80 | 19,10 | 0,101 | 0,131 |
| С предварительной вибро- обработкой связующего (100 Гц, 60 мкм) | 12,88 | 29,33 | 22,37 | 6,203 | 8,55 | 0,098 | 0,103 |

Список литературы

1. Зеленев Ю.В. Прогнозирование изменения физических свойств полимерных материалов при разных способах их модификации / Ю.В. Зеленев, В.И. Хромов // Пластические массы. 2002. № 11.
2. Еренков О.Ю. Исследование механических свойств ПКМ в зависимости от предварительного электрофизического воздействия на связующее / О.Ю. Еренков, П.В. Игумнов, В.Л. Никищечкин // Известия ОрелГТУ. № 3 – 2/275(561) 2009.
3. Еренков О.Ю., Никищечкин В.Л. Исследование эффективности влияния предварительной электрофизической обработки связующего на прочностные характеристики ПКМ // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2010.- № I-1 (2). – С. 99 – 104.

**INCREASING THE STRENGTH OF FIBERGLASS BY MEANS OF EPOXY BINDER
VIBRATION TREATMENT**

Erenkov O.Yu., D.Sc. (Engineering) professor, e – mail: erenkov@list.ru

Uzinskaya D.D., masters, Degree, e – mail: erenkov@list.ru

Pacific National University, 136 Tikhooceanskaya st., Khabarovsk, 680035, Russia.

Abstract

The aim of the work is to study of the relationship between the strength properties of parts made of fiberglass by vacuum-compression impregnation method, and the kind and parameters of preliminary electro physical impacts on the epoxy binder. It was found that the best mode of vibration treatment polymeric binder is frequency 100 Hz at the oscillation amplitude 60 mm, as in the implementation of such vibrating regime of binder observed maximum values of studied strength characteristics of produced fiberglass. Proved experimentally the fact of changing the structure of the polymer binder after its vibration treatment, as evidenced by the results of change density samples from the binder, as well as established the nature of such changes and optimal time of treatment is 5 minutes.

Keywords: fiberglass, polymer binder, super molecular structure, oscillation amplitude, oscillation frequency, mechanical properties.

УДК 621.762.4

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
РКУ – ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК**

*РЯБИЧЕВА Л. А., доктор техн. наук, профессор,
БАБИЧ И. Н., аспирант
(ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, Украина)*

Рябичева Л.А. – 91034, г. Луганск, кв. Молодежный 20 а,
Луганский национальный университет им. В. Даля,
е – email: ryabic@gmail.com.

Аннотация

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния и распределения плотности в объеме заготовки при равноканальном угловом прессовании. Показано, влияние противодействия на положение очага деформации. По результатам измерения микротвердости установлено наличие зоны турбулентности, обеспечивающей фрагментацию структуры материала. Представлена возможность получения высокоплотных заготовок без разрыхления и трещин с высокими механическими свойствами и более равномерным напряженно – деформированным состоянием после второго прохода с противодействием 150 МПа.

Ключевые слова: равноканальное угловое прессование, порошковая заготовка, напряжение, деформация, противодействие, относительная плотность, микротвердость.

Введение

Эффективными способами производства материалов с заданными свойствами являются различные методы интенсивной пластической деформации, к которым относится равноканальное угловое прессование (РКУ – прессование). РКУ – прессование позволяет получить высокоплотные порошковые материалы с ультрамелкодисперсной структурой, в результате чего качественно изменяются их свойства. В работах [1, 2] рассмотрены результаты компьютерного моделирования РКУ – прессования порошковой заготовки различной пористости без противодействия. Показано изменение очагов уплотнения и деформации в зависимости от физико – механических свойств материала и условий деформирования. При деформировании без противодействия участок образца, выходящий на свободную поверхность, не пропрессовывается и сохраняется плотность такая же, как у исходного образца. В работе [3] получено, что с помощью РКУ – прессования пористых заготовок при наличии противодействия можно достичь максимальной плотности при большой величине начальной пористости образца.

Целью данной работы является дальнейшее теоретическое и экспериментальное исследование уплотнения и пластического формоизменения порошковой пористой заготовки, подвергнутой РКУ – прессованию с противодействием за один и два прохода.

Математическая модель

Математическое моделирование РКУ – прессования выполнено на основе закономерностей теории пластичности пористых тел, согласно которым пластический потенциал рассматривается как

функция компонентов тензора напряжений, и которому в пространстве напряжений отвечает гладкая, выпуклая и замкнутая поверхность [4, 5]. Этот потенциал может быть представлен в виде:

$$F = \frac{\tau^2}{\varphi} + (1+m)^2 \frac{\left(p + \frac{m}{m+1} \bar{\rho} \sigma_s \sqrt{\psi} \right)^2}{\psi} - \bar{\rho} \sigma_s, \quad (1)$$

где $p = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$ - среднее давление;

$\tau = \sqrt{(\sigma_{ij} - p \delta_{ij})(\sigma_{ij} - p \delta_{ij})}$ - интенсивность касательных напряжений;

$\varphi = (1-\theta)^2$, $\psi = \frac{2(1-\theta)^2}{3\theta}$ - функции пористости θ ;

$\bar{\rho} = 1 - \theta$ - относительная плотность.

m - параметр, характеризующий степень несовершенства контактов в порошковой заготовке и определяющий разное сопротивление пористой заготовки при ее испытании на растяжение и сжатие. Скорость изменения объема в результате пластической деформации:

$$e \sim \frac{2(1+m)^2}{\psi} p + \frac{2m(1+m)\sigma_0}{\sqrt{\psi}}, \quad (2)$$

где σ_0 - напряжение течения твердой фазы, которое является функцией накопленной деформации ω и определяется по кривой упрочнения материала порошка при одноосном растяжении.

Напряжение течения твердой фазы может быть представлено в виде зависимости $\sigma = \sigma_0 + K\omega^{0.5}$, где K - коэффициент упрочнения. В расчетах принимали $K/\sigma_0 = 0,5$.

Скорость накопления деформации в твердой фазе пористого тела определялась на основе постулата В.В. Скорохода [6] об однозначности диссипативной функции:

$$\omega = \sqrt{1-\theta} \left(\frac{m}{1+m} \sqrt{\psi} e + \frac{\sqrt{(1+m)^2 \gamma^2 + e^2 \psi}}{1+m} \right), \quad (3)$$

где γ - скорость изменения формы.

Величина накопленной деформации ω возобновляется путем решения дифференциального уравнения:

$$\frac{d\omega}{dt} = W, \quad (4)$$

где W - эквивалентная скорость деформации:

$$W = \frac{1}{\sqrt{1-\Theta}} \sqrt{\psi e^2 + \varphi \gamma^2}. \quad (5)$$

Для определения распределения интенсивности напряжений и деформаций, а также относительной плотности использован метод конечных элементов, который представлен в виде последовательности процедур. Первой процедурой является триангуляция области пластически деформированного тела или переход от сплошной заготовки к ее конечноэлементному аналогу. При этом использовано требование экстремальности функционала:

$$J(v_i(x)) = \int_{\Omega} D(e_{ij}(V_i)) d\Omega + \int_{\partial\Omega_p} p_i v_i d(\partial\Omega), \quad (6)$$

где $D(e_{ij}(V_i))$ - диссипативная функция;

p_i - вектор напряжений на поверхности рассматриваемого образца;

v_i - вектор скорости на той же поверхности.

Первый интеграл в формуле (6) представляет собой полную скорость диссипации энергии, второй интеграл – мощность внешних напряжений.

Для пористой заготовки, которая деформируется пластически, диссипативная функция $D(e_{ij}(V_i))$ имеет вид:

$$D(e_{ij}(V_i)) = \frac{\sqrt{\gamma^2 \varphi + e^2 \psi}}{\sqrt{1-\theta}} \tau_s + \frac{p_0 e}{\sqrt{1-\theta}}, \quad (7)$$

$$\text{где } V_i = v(x), \quad e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad p_0 = -\sqrt{\frac{2}{3}} \tau_s \sqrt{\psi} \frac{m}{1+m},$$

τ_s - предел текучести твердой фазы на сдвиг

Визуализация математической модели

Зависимости (1) - (7) использованы для конечно – элементного анализа РКУ – прессования медной пористой заготовки призматической формы сечением 15x15 мм, длиной 59 мм, исходной пористостью 42 %. Заготовки получали из электролитического медного порошка марки ПМС – 1 ГОСТ 4960 – 75 двусторонним прессованием на гидравлическом прессе модели ПД – 476 силой 1600 кН.

Спекание осуществляли в среде синтез – газа. РКУ – прессование выполняли по схеме, представленной на рис. 1, на гидравлическом прессе модели ПД – 476 силой 1600 кН. Перед РКУ – прессованием на заготовку наносили координатную сетку размером 3x3 мм. Давление прессования для первого прохода составляло 890 МПа, а для второго прохода – 1330 МПа. Величину противодействия принимали для первого прохода 90 МПа, для второго – 150 МПа.

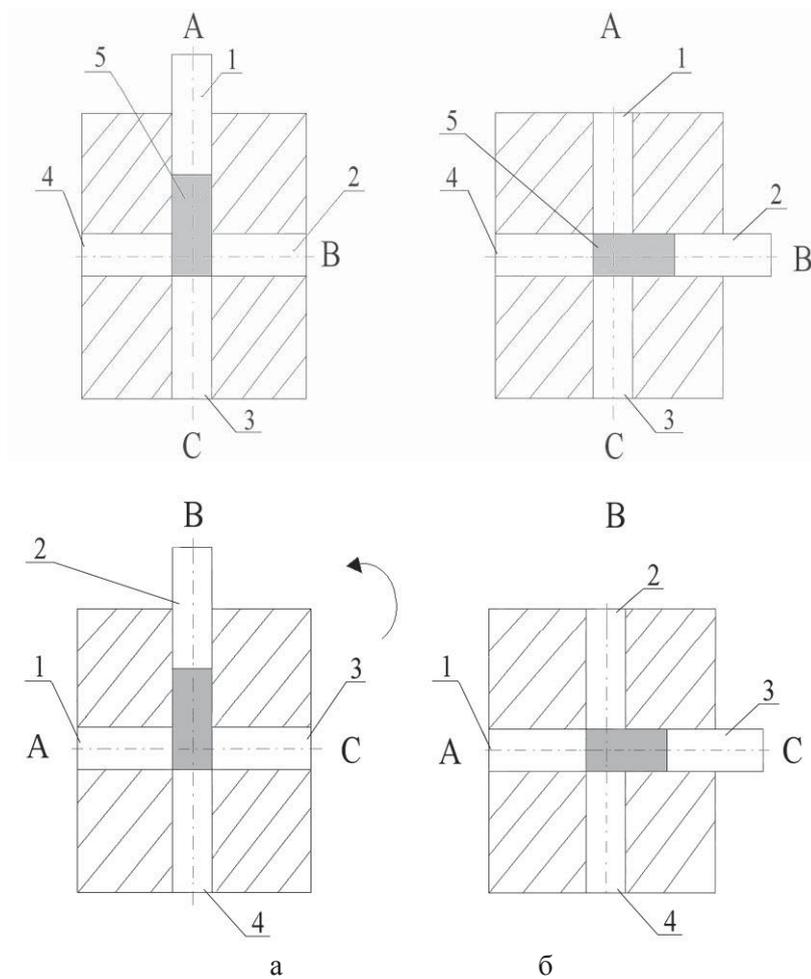


Рис. 1. Схема РКУ – прессования: а – первый проход; б – второй проход

Распределение параметров напряженно – деформированного состояния по сечениям 1, 2 и 3 (рис. 2) после первого и второго проходов представлено на рис. 3. На первом проходе сечение 1 находится со стороны противодействия, сечение 3 – под пуансоном.

Напряженно – деформированное состояние после первого прохода отличается выраженной неравномерностью (рис. 3, а). В сечении 1 наблюдается увеличение интенсивности напряжений с нижней грани заготовки к верхней, причем в очаге деформации максимальная интенсивность напряжений достигает 251 МПа. На верхней грани заготовки интенсивность напряжений довольно резко уменьшается. В сечении 2 наблюдается такой же характер изменения интенсивности напряжений с несколько большей величиной в очаге деформации. В сечении 3 под пуансоном под действием сил трения формируется второй очаг деформации, подобно закрытой осадке: интенсивность напряжений возрастает от нижней грани к верхней. При этом под пуансоном интенсивность напряжений равна 198 МПа.

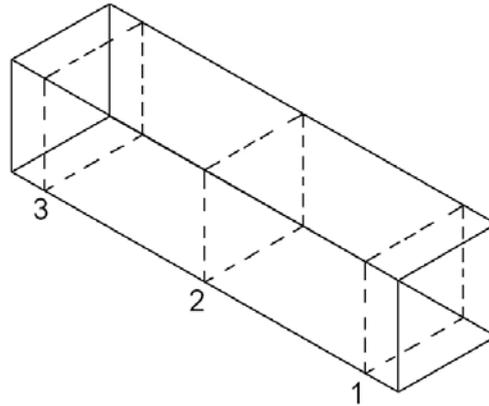


Рис. 2. Сечения заготовки

Второй проход осуществляется после поворота заготовки: сечение 1 занимает место под пуансоном, сечение 3 – со стороны противодействия, обозначения остаются те же. В сечении 1 со стороны противодействия наблюдается уменьшения интенсивности напряжений с нижней грани до верхней. В сечении 2 остается очаг деформации с максимальной интенсивностью напряжений, но при этом размер его меньше вследствие упрочнения твердой фазы, полученного на первом проходе. В сечении 3 под пуансоном наблюдается уменьшение неравномерности интенсивности напряжений (рис. 3, а).

Изменение интенсивности деформаций свидетельствует о том, что после первого прохода очаг деформации занимает основную центральную часть заготовки, охватывая объем заготовки от пуансона до противодействия. При этом интенсивность деформации максимальна в очаге деформации и на угловой части верхней грани. После второго прохода объем очага деформации уменьшается, уплотнение минимально, происходит деформация частиц порошка. Очевидно скорость изменения объема заготовки уже меньше скорости формоизменения.

Экспериментально проверенное распределение интенсивности деформаций показано на рис. 4. Характер и величина интенсивности деформаций подобна картине, полученной моделированием. После первого прохода на верхней грани заготовки в сечении 1 получено разрыхление, что свидетельствует о недостаточной величине противодействия. После второго прохода с увеличением противодействия до 150 МПа заготовка не имела рыхлости и трещин. Координатная сетка была сильно искажена. В очаге деформации наблюдалось образование вихрей, что свидетельствует об интенсивности образования высокоугловых границ [7]

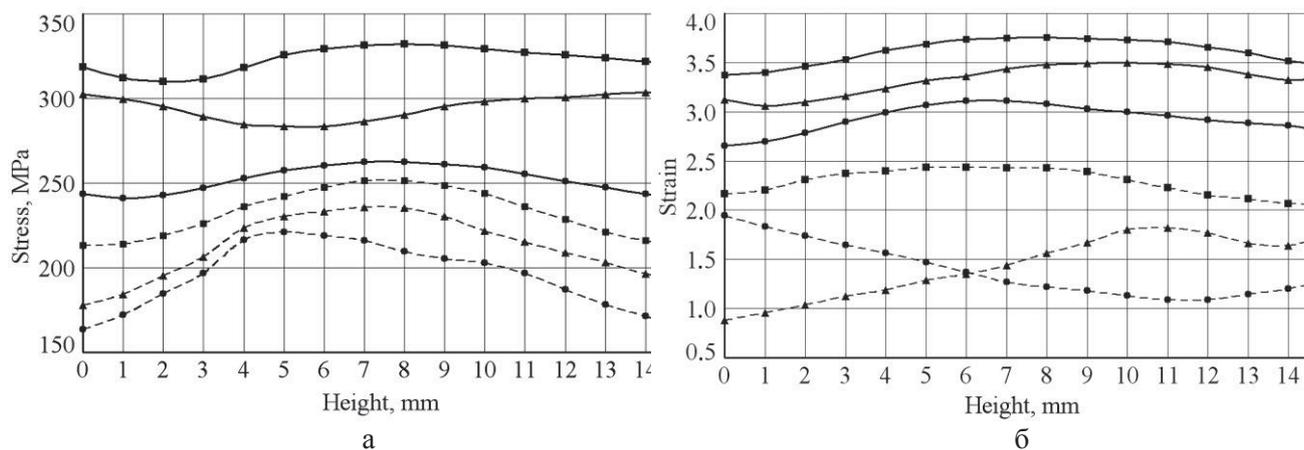


Рис. 3. Распределение интенсивностей напряжений – а и деформаций – б по сечениям 1, 2 и 3, полученное моделированием: 1₁, 2₁, 3₁ – после 1 прохода; 1₂, 2₂, 3₂ – после 2 прохода

Для экспериментальной оценки напряженного состояния исследовали изменение микротвердости по продольному сечению образца после первого и второго проходов. После первого прохода наблюдается немонотонное распределение микротвердости. При росте интенсивности деформаций уровень микротвердости по сечению образца увеличивается от наружных граней к центру. В очаге деформации получена максимальная микротвердость 714 МПа, соответствующая максимальной интенсивности деформаций. В зоне со стороны противодействия микротвердость составила 480 МПа при интенсивности деформаций 1, 2, что связано с развитием рыхлости. После второго прохода с ростом накопленной деформации наблюдается прирост микротвердости, при этом уменьшается разбег значений между поверхностью и центром образца.

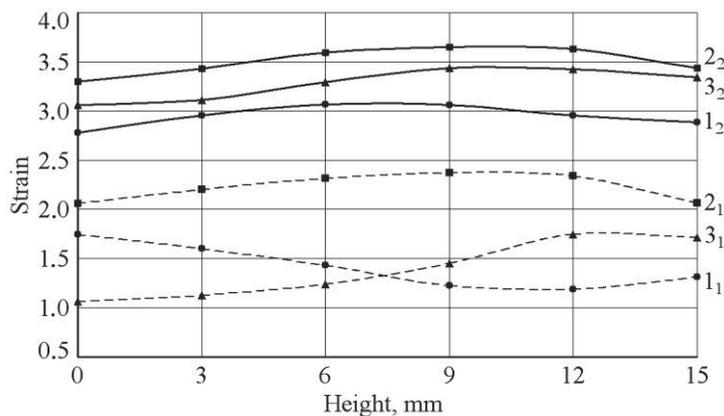


Рис. 4. Распределение интенсивности деформаций по сечениям 1, 2 и 3 (экспериментальное): 1₁, 2₁, 3₁ – после 1 прохода; 1₂, 2₂, 3₂ – после 2 прохода

В зоне очага деформации получена максимальная микротвердость 780 МПа, здесь же наблюдается зарождение вихревого поля, которое связано с поперечным перетеканием материала в плоскости, перпендикулярной к оси деформации. Основному росту микротвердости в средней зоне и зоне под пуансоном соответствует максимальная интенсивность деформации, которая после второго прохода составляла 4,0.

Распределение относительной плотности по длине образца показано на рис. 5.

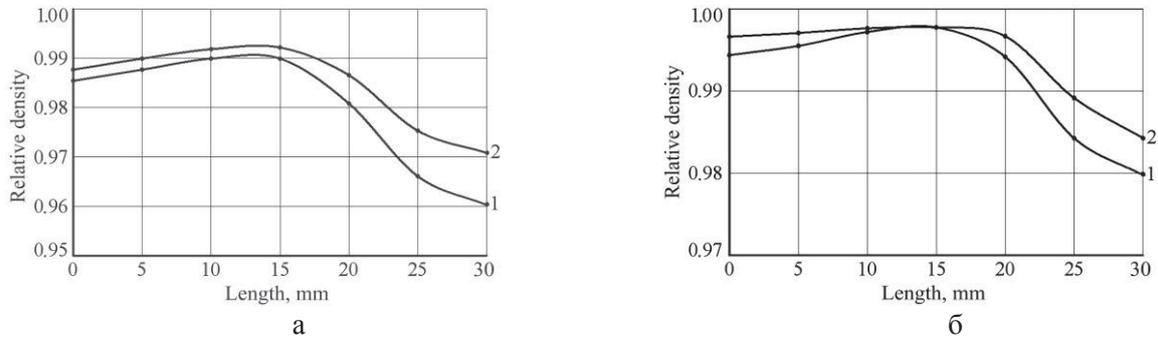


Рис. 5. Распределение плотности по длине образцов после РКУ – прессования:
 а – после первого прохода; б – после второго прохода;
 1 – экспериментальная зависимость; 2 – расчетная зависимость

Установлено, что в объеме образца после первого прохода можно выделить три зоны: 1 – зона разрыхления, возникающая со стороны противодействия; 2 – средняя зона, в которой получена максимальная плотность; 3 – зона под пуансоном. Размер каждой из зон составил около 10 мм. При этом со стороны противодействия глубина нарушенного слоя после первого прохода составила 0,4 мм. Неравномерное распределение относительной плотности после первого прохода объясняется неравномерностью напряженно-деформированного состояния заготовки и действием сил трения. После второго прохода относительная плотность практически равная 1 наблюдается в зонах 2 и 3. Со стороны противодействия плотность уменьшается.

Выводы

Теоретические исследования и конечно – элементное моделирование, подтвержденные результатами лабораторных экспериментов, показали, что после первого прохода РКУ – прессования порошковой пористой заготовки с использованием противодействия 90 МПа в объеме заготовки получена плотность меньшая, чем плотность компактного материала. Очаг деформации занимает большой объем, охватывая все три зоны, выделенные в заготовке. Напряженно – деформированное состояние характеризуется значительной неравномерностью. После второго прохода с противодействием 150 МПа получена высокоплотная заготовка без разрыхления и трещин с равномерным напряженно – деформированным состоянием. Размер очага деформации уменьшается. Оценкой микротвердости установлено наличие зоны турбулентности, обеспечивающей фрагментацию структуры и способствующей получению заготовок порошковых материалов с ультрамелкозернистой структурой и высокими механическими свойствами.

Список литературы

1. Maydanyuk A., Shtern M., Bagluck G., Ryabicheva L. Equal channel angular extrusion of porous billets: computer simulation and experimental study // The International congress and exhibition EURO PM 2010 proceedings, October 10 – 14, 2010, Florence, Vol. 3. P. 1206 – 1212.
2. Майданюк А.П., Рябичева Л.А., М.Б. Штерн М.Б., Г.А. Баглюк Эволюция распределения плотности при равноканальном угловом прессовании пористых заготовок. Вісн. Східноукр. націон. ун-ту. – 2008. №3 , Ч.2. – С.213 – 216.
3. Рябичева Л.А., Смоляк В.В. Деформационное поведение порошковой пористой заготовки при РКУ-прессовании. Вестник Национального технического университета «ХПИ», 2010. С. 141 – 145.
4. Favrot N., Besson J., Colin C., Delannay F., Bienvenu Y. Modeling Sintering Deformations occurring After Cold Compaction, Qualitative Methods for the Mechanics of Compaction. Proceedings of the International Workshop on Modeling of Metal Powder Forming Process, Grenoble, France, 21 – 23 July 1997. P. 133 – 147.
5. Штерн М.Б. Феноменологические теории прессования порошков. К.: Наукова думка, 1982. 140 с.
6. Скороход В.В. Реологические основы теории спекания. К.: Наукова думка, 1972. – 152 с.
7. Бейгельзимер Я. Е. Некоторые соображения по поводу больших пластических деформаций, основанные на их аналогии с турбулентностью. Физика и техника высоких давлений. 2008. Т. 18. № 4. С. 77 – 86.

MODELING AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EQUAL CHANNEL ANGULAR EXTRUSION OF SINTERED POROUS BILLETS

Ryabicheva L.A., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: ryabic@gmail.com

Babich I.N., graduate student (Engineering), e – mail: babichirinikolaevna89@mail.ru

Volodymyr Dahl Lugansk National University, quarter Youth 20-a, Lugansk, 91034, Ukraine.

Abstract

The distributions of stress, strain, microhardness and relative density after one and two passes of equal channel angular extrusion of high-porous billets with back pressure have been considered theoretically and experimentally. It was shown, that the deformation zone with high values of stress and strain intensities was formed in the billet after the first pass. Thus, density did not reach maximum value. By results of measurement of microhardness existence of a zone of the turbulence providing fragmentation of structure of material is established. After the second pass, compact material was obtained in the deformation zone of diminishing size due to appearance of vortex flows and decreasing rate of volumes changing in compare with the first pass, while increasing of back pressure. The possibility of receiving high density preparations without loosening and cracks with high mechanical properties and more uniform intense deformed state after the second pass with the counter-pressure of 150 MPas is presented.

Keywords: equal channel angular extrusion, porous billet, stress, strain, relative density, microhardness.

УДК 621.785

**ФОРМИРОВАНИЕ УПРОЧЕННОГО СЛОЯ С ВЫСОКОЙ ТВЕРДОСТЬЮ
В НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМЕННОЙ
ПОВЕРХНОСТНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ**

*ВУ ВАН ГЮИ, аспирант,
БАЛАНОВСКИЙ А. Е., канд. техн. наук, доцент
(ИрННТУ, г. Иркутск, Россия)*

Ву Ван Гюи – 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
е – mail: huy241989@gmail.com

Аннотация

Рассмотрен новый метод насыщения поверхности стали углеродом под действием плазменной дуги и изготовление нового типа графитового покрытия на основе жидкого стекла для процесса цементации. Изучена микроструктура и микротвердость упроченного слоя после обработки данным методом. Установлено, что за время воздействия плазмы 0,1 – 1с поверхностный слой насыщается углеродом до уровня концентрации белого чугуна. Изучены микроструктуры и характеристики поверхности металла после плазменной цементации. Определены основные параметры цементированного слоя: глубина цементированного слоя составляет 35-2500мкм, микротвердость до 12000 МПа

Ключевые слова: Плазменная поверхностная цементация, микроструктура, белый чугун, пластинчатый мартенсит, диффузия, микротвердости, Visual environment.

Введение

Известно [1], что основными причинами выхода из строя изделий являются изнашивание их рабочей поверхности и интенсивное образование трещин при динамических и знакопеременных термомеханических нагрузках. При этом работоспособность деталей машин во многом определяется состоянием поверхностных слоев, поскольку в них зарождаются и развиваются микротрещины, приводящие к износу и повреждениям, что снижает срок службы машин и агрегатов [2]. Совершенствование технологии поверхностного упрочнения является актуальной проблемой в машиностроении. Среди существующих основных направлений поверхностно упрочнения, можно выделить одно из наиболее эффективных и широко применяемых в промышленности плазменная поверхностная обработка [2 – 4]. В последние годы благодаря проведенным исследованиям в работах А. Е. Балановского, В. А. Короткова, Л. К. Лещинского, Е. Н. Сафонова, С.С. Смотугина и др. авторов и внедрению конкретных технологий плазменного упрочнения в производство инструмента, в поверхностное упрочнение боковой поверхности рельса и бандажей локомотивов плазменная поверхностная обработка получает широкое распространение в промышленности .

Плазменная цементация с использованием углеродосодержащих паст впервые рассмотрена в работах [3] и продолжена в работах [2, 5]. В работах с использованием лазерного поверхностной цементации [7] и электронно-лучевой поверхностной цементации [8] рассмотрены возможности микро и макро наплавки поверхностных слоев с использованием углеродосодержащих паст и обмазок.

Сущностью данных методов заключается в нанесении на поверхность деталей углеродосодержащей обмазки или покрытия, которое оплавляется под воздействием концентрированного потока энергии (лазер, электронный луч, плазменная дуга (струя)). Под действием газодинамической силы плазменной струи (дуги) происходит интенсивное перемешивание жидкого металла с углеродом и при последующей кристаллизации образуется легированный слой с большим количеством углерода [1]. В работах [2, 3] показано, что плазменная цементация из твердой фазы возможна только с оплавлением поверхности, т.е. с образованием жидкой ванны металла, как при наплавке. В связи с этим, упроченная таким способом деталь необходимо подвергать дополнительной финишной механической обработке.

В работе [5] мы предложили новый состав углеродосодержащего покрытия (на основе жидкого стекла и графита) для нанесения на поверхности деталей машин и инструментов в сочетании с новым составом плазмообразующего газа (смесь аргона и углекислого газа), что позволяет насыщать поверхность металла углеродом без образования жидкой сварочной ванны. Известны экспериментальные работы по изучению диффузии углерода с поверхности в объём металла через переходный слой карбидов [9] образующийся на поверхности. В нашем технологическом процессе переходный слой карбида железа образуется на границе раздела «твердое тело-газ». Углерод из переходного карбида железа легко диффундирует в железо в атомарном виде, при этом углекислый газ используется нами с одной стороны, как источник дополнительного углерода, а с другой стороны, как активатор диффузионных процессов на поверхности раздела «газ (плазма)-твёрдое тело» для увеличения глубины и ширины цементированного слоя зоны. При таком сочетании новых технологических признаков, углерод будет проникать в металл через тонкую жидкую пленку поверхности металла без образования жидкой ванны.

Цель работы – рассмотреть возможность процесса плазменной поверхностной цементации в твердой фазе с использованием графитовой пасты.

Методика выполнения работы

Плазменную поверхностную цементацию проводили на стали 3. Экспериментальная часть работы состояла из нескольких этапов. На рис. 1 приведена схема процесса изготовления графитового покрытия и последующей плазменной обработки.

В качестве твердого покрытия для цементации использовали пасту следующего состава: графит, жидкое стекло, вода, водосмешиваемые СОЖ. Для контроля толщины покрытия применяли понятие «удельный вес покрытия», г/мм².

$$\delta = \frac{m}{S} \quad (1)$$

где: δ – удельный вес покрытия, г/мм²; m – масса покрытия как разница масс до нанесения и после (г); S – площадь нанесения (мм²).

Плазменная поверхностная цементация с применением плазменной дуги выполнялась на установке, которая включает источник питания, осциллятор (блок управления), пульт дистанционного управления, цифровой анализатор (для снятия значений силы тока и напряжения), систему охлаждения, баллонную установку с плазмообразующими газами (аргоном, углекислым газом), горелку-плазматрон и штатив. Штатив оснащён зажимными устройствами, которые позволяют закреплять горелку – плазматрон и менять высоту дугового промежутка. Также установка состоит из столика. Столик оснащён специальными прижимными элементами для закрепления на нем заранее подготовленных фрагментов образцов. Движение столика осуществляется с помощью электрического привода, который работает от источника питания 24 В.

В качестве источника плазмы использована электрическая дуга в среде аргона и углекислого газа. Углекислый газ применяется для создания окислительной среды плазмы и повышения теплосодержания плазмы, ускорения процесса насыщения углеродом. Режимы плазменной цементации были следующие: тепловая мощность плазменной дуги 1,8 кВт; расход аргона 8–10л/мин, углекислый газ 1л/мин, зазор между плазмотроном и деталью 3 – 5 мм, скорость движения образцов 5 – 10 мм/с.

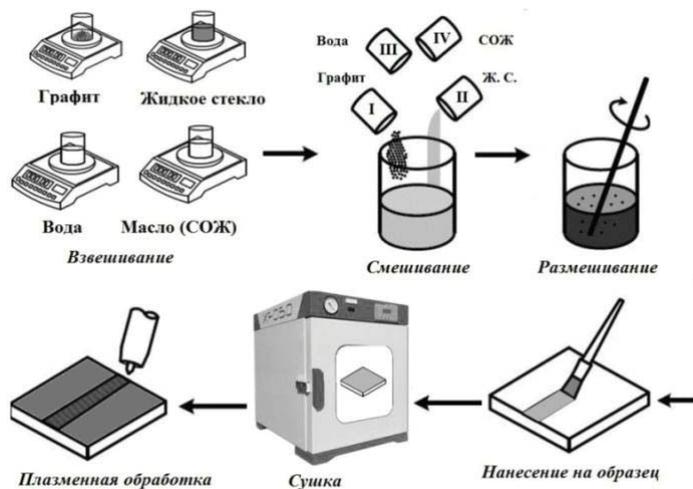


Рис. 1. Схема процесса плазменной цементации

Для подготовки и изучения микрошлифов использовалось следующее оборудование: автоматический отрезной станок Полилаб Р100А для резки металлографических и петрографических образцов. Для запрессовки образцов использовался пресс “Полилаб С50А”. Для полировки поверхности микрошлифов использовался шлифовально-полировальный станок “Полилаб П12М”. Микротвердость измеряется на приборе ПМТ – 3. Шероховатость измерена на профилометре «TaylorHobsonFormTalysurf i200» и оптическом профилометре «BrukerContour GT – K1».

На рис. 2 а, б показан внешний вид образца для исследования, имеющего чистую поверхность и после нанесения графитового покрытия. В рис. 2 в показан образец после нагрева плазменной дугой и удаления оставшегося покрытия на поверхности.

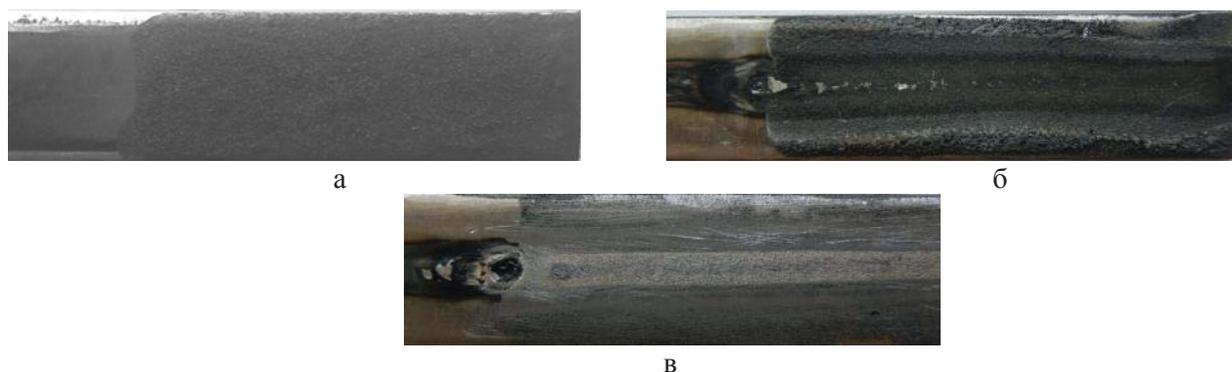


Рис.2. Металлический образец для испытания

а – образец с графитовым покрытием; б – образец после обработки плазменной дугой; в – образец после удаления остатков покрытия

Результаты и обсуждения

Проведенные исследования металлических образцов, обработанных плазменной дугой показали, что на поверхности визуально виден упрочненный слой. После травления шлифов в поперечном сечении под микроскопом наблюдается цементированный слой в виде белого слоя, который имеет высокую микротвердость от 4000 – 12000 МПа (при нагрузке 2Н). Установлено, что микротвердость поверхностного слоя зависит от соотношения графита и жидкого стекла в покрытии, скорости охлаждения. Экспериментально доказано, что в составе графитового покрытия оптимальный процент жидкого стекла находится в пределах от 30 – 83 %. Если процент жидкого стекла меньше 30 %, то прочность сцепления покрытия с металлом не достаточна, и оно разлетается после воздействия плазменной дуги. Если процент жидкого стекла больше 83 %, то не наблюдается процесса насыщения углеродом поверхностного слоя металла. При составе графитового покрытия с 30 % жидкого стекла после обработки образуется отбеленный слой (рис. 3 а), в основном состоящий из двух слоев: ледебурита, мартенсита. У первого слоя микротвердость фиксируется от 9000 – 12000 МПа. Второй слой, имеющий небольшую толщину 15 – 25 мкм, обладает микротвердостью от 6000 – 8000 МПа. С увеличением количества жидкого стекла в составе графитового покрытия до 60 %, в поверхностном слое получается структура отбеленного чугуна. Упрочненный поверхностный слой состоит из четырех подслоев: ледебурит, ледебурит + остаточный аустенит + мартенсит, остаточный аустенит + мартенсит, мартенсит (рис. 3 б). Микротвердость структуры поверхностного слоя представлена в таблице.

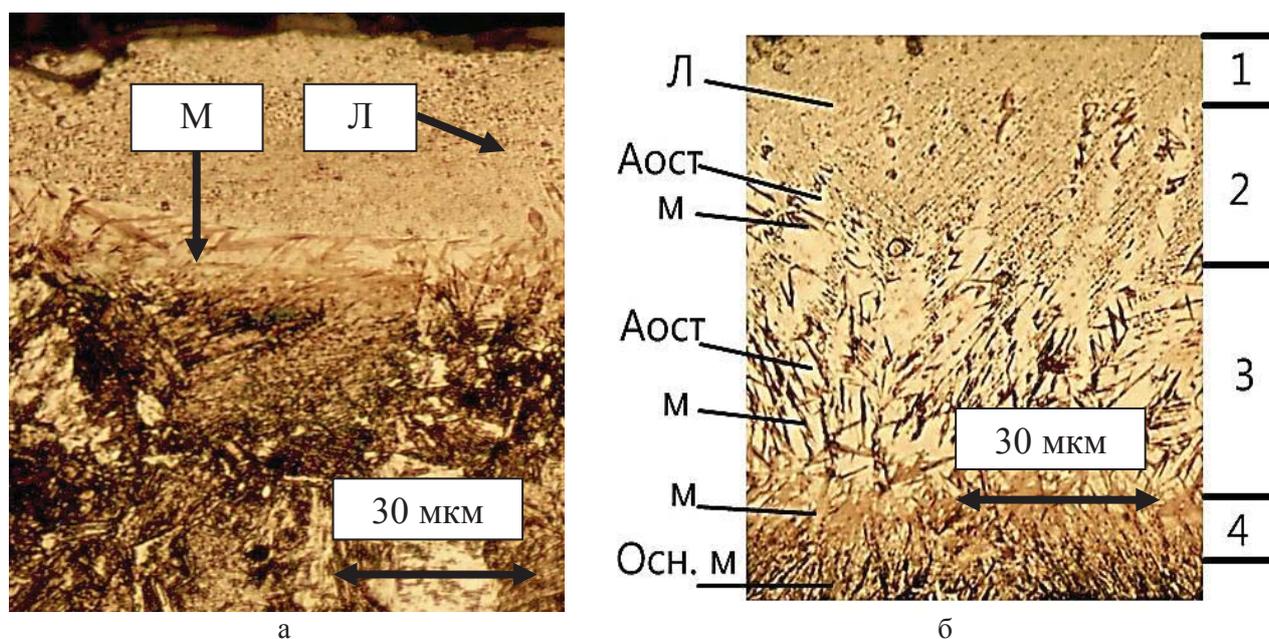


Рис. 3. Микроструктура цементруемого слоя:
 а – при покрытии с 30% жидкого стекла ($V = 5 \text{ мм/с}$);
 б – при покрытии с 60% жидкого стекла ($V = 5 \text{ мм/с}$)

Микротвердость упрочненных подслоев

| Упрочненный слой | Микротвердость |
|---|------------------|
| Ледебурит | 9000 – 12000 МПа |
| Ледебурит + остаточный аустенит + мартенсит | 8000 – 9000 МПа |
| Остаточный аустенит + мартенсит | 5000 – 7000 МПа |
| Мартенсит | 6000 – 8000 МПа |

При обработке плазменной дугой графитовых покрытий в состав которых входит 80 % жидкого стекла образуется отбеленный слой (рис. 4 а), состоящий из двух слоев: остаточный аустенит + мартенсит. Первый слой не травится и имеет низкую микротвердость 4000 – 5500 МПа. Большое количество остаточного аустенита показывает на недостаточность скорости охлаждения при плазменной поверхностной цементации. С помощью программного комплекса Visual environment 8.6 мы определили ориентировочно скорость охлаждения при различных скоростях обработки. Расчет показал, что при перемещении плазменной дуги со скоростью 5 мм/с и образце размерами 20x80x10 мм скорость охлаждения составляет $V_{\text{охл.}} = 1740 \text{ }^{\circ}\text{C/с}$. На рис. 4 б показана микроструктура цементированного слоя после плазменного нагрева при скорости перемещения дуги 10 мм/с. Видно, что количество мартенсита в цементированном слое увеличивается. Микротвердость данного слоя находится в пределах 5000 – 7500 МПа. Расчет с помощью программного комплекса Visualenvironment 8.6 показывает, что скорость охлаждения составила $3450 \text{ }^{\circ}\text{C/с}$ (максимальная скорость охлаждения).

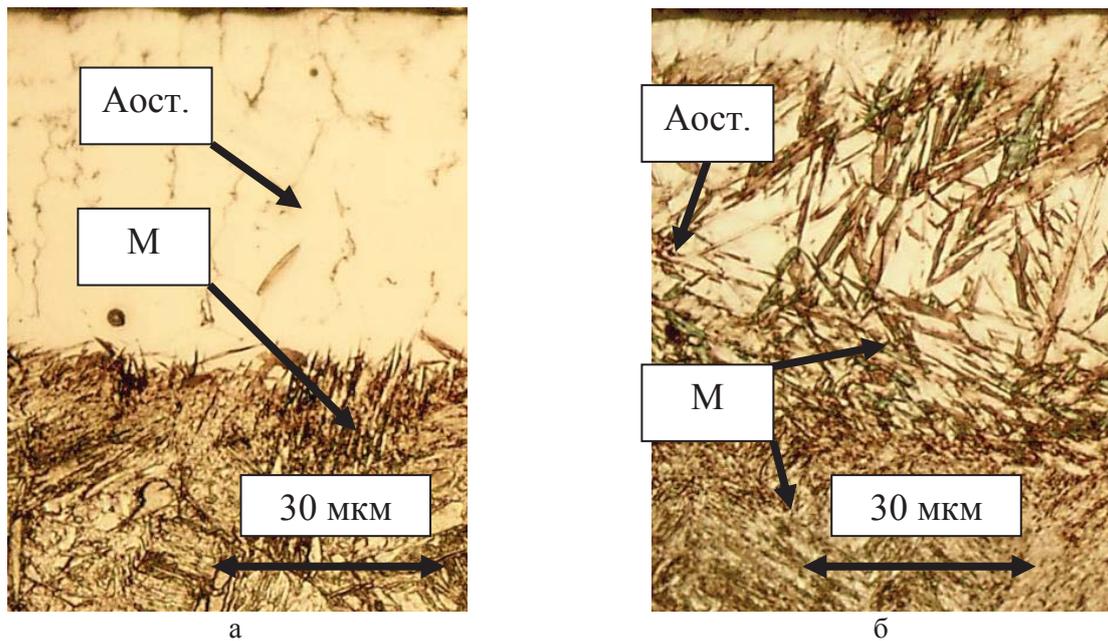


Рис. 4. Микроструктура цементруемого слоя
 а – при покрытии с 80 % жидкого стекла ($V = 5 \text{ мм/с}$, $V_{\text{охл.}} = 1740 \text{ }^{\circ}\text{C/с}$);
 б – слоя при покрытии с 80 % жидкого стекла ($V = 10 \text{ мм/с}$, $V_{\text{охл.}} = 3450 \text{ }^{\circ}\text{C/с}$)

При увеличении скорости охлаждения до $5600^{\circ}\text{C}/\text{с}$ за счет снижения пятна нагрева (уменьшение расстояние между деталью и электродом) упрочненный слой на 90 % состоит игольчатого мартенсита с высокой твердостью 9000 – 11000 МПа и 10 % остаточного аустенита (рис. 5). На рис. 6 представлены результаты измерения микротвердости по глубине цементированного слоя с различными составами покрытия и скоростями охлаждения. Результаты представлены в виде гистограмм, с измерением в нескольких точках для каждого значения в поперечном разрезе, с целью повышения достоверности результатов. Известно, что за эффективную толщину цементированного слоя принимают расстояние от поверхности детали до половины переходной зоны, где структура соответствует стали, содержащей 0,4...0,45 % С, что соответствует значениям твердости 50 HRC. В нашем случаи мы знаем максимальную твердость получаемую в результате плазменной закалки стали Сталь 3 (не более 5000 МПа) [2], а следовательно, все что выше этого значения мы будем относить к эффекту цементации.

Таким образом, представленные выше результаты показывают возможность осуществления поверхностной плазменной цементации где важным параметрами является состав цементующей пасты(обмазки) и скорость охлаждения поверхностного слоя металла. В целом благодаря положительным свойствам разработанного нами покрытия (высокой электропроводности и механической прочности, термостойкости), и из – за высокого теплосодержание плазмы (в среде аргоне и углекислого газа, пароводяной плазмы) дуга горит стабильно и устойчиво на поверхности системы «покрытие – металл», что увеличивает коэффициент диффузии углерода в поверхностный слой металла.

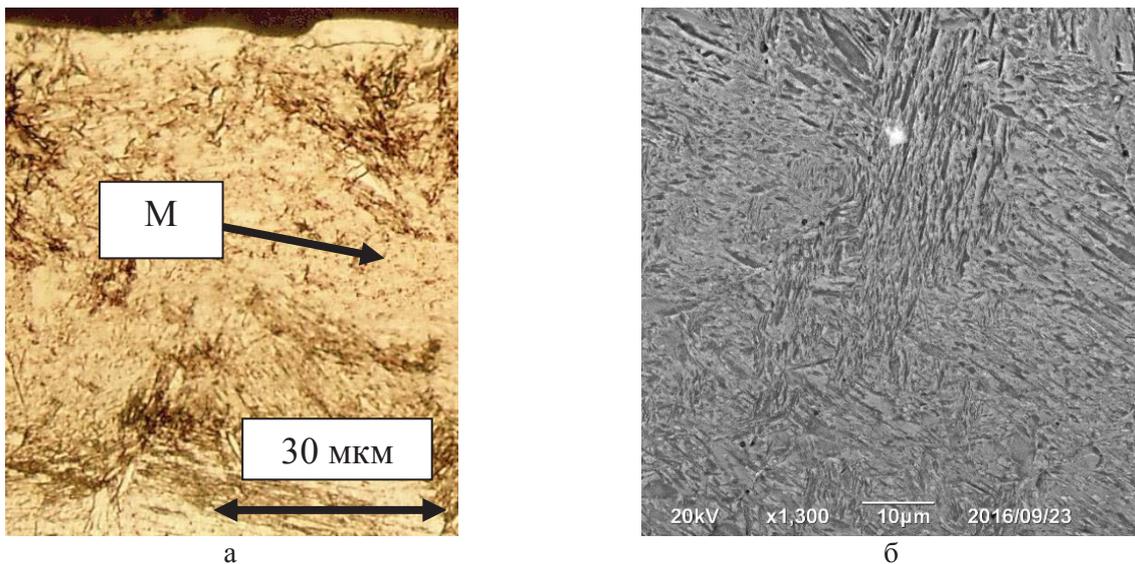


Рис. 5. Микроструктура цементруемого слоя при покрытии с 80 % жидкого стекла ($V = 10 \text{ мм}/\text{с}$, $V_{\text{охл.}} = 5600^{\circ}\text{C}/\text{с}$):
 а – при 500 раз увеличения;
 б – при 1300 раз увеличения под электронным микроскопом

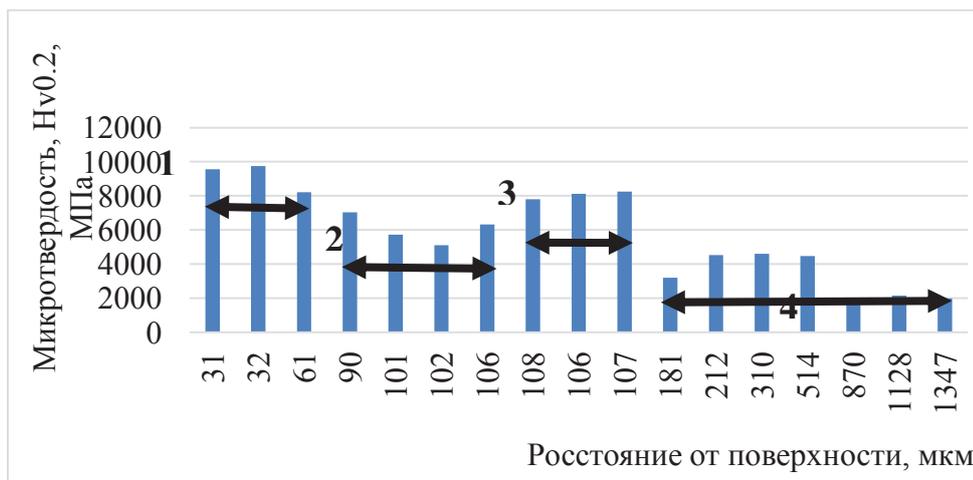


Рис. 6. Распределение микротвердости по глубине цементированного слоя с мягким внутренним слоем (рис. 3 б)

1 – слой ледебурита; 2 – остаточный аустенит + пластинчатый мартенсит + ледебурит; 3 – игольчатый мартенсит; 4 – зоны ЗТВ и исходная структура

При обработке данным способом появляется граничное состояние поверхности деталей, где тонкие поверхностные слои могут иметь следы микро оплавления, без образования ванны жидкого металла в виде тонкой пленки. В таком состоянии процесс диффузии углерода в металл значительно ускоряется. Достоинство данного метода заключается в том, что поверхность металла после обработки не разрушается, ее шероховатость находится в пределах $Ra < 5$ мкм.

Выводы

1. Разработанная пилотная технология плазменной цементации позволяет насыщать поверхность деталей углеродом в течение несколько секунд, при этом не вызывается сильное оплавление поверхности. Цементируемый слой на поверхности стали 3 достигает толщины 200 – 250 мкм с микротвердостью 8000 – 12000 МПа.
2. Регулируя соотношения компонентов входящих в состав углеродосодержащего покрытия, возможно, получить различную степень шероховатость конечной поверхности.

Список литературы

1. Болховитинов Н.Ф. Металловедение и термическая обработка. – М.: Машиностроение, 1965. – 505 с.
2. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов/ А. Е. Балановский; М-во образования и науки РФ, Иркутский гос. технический ун-т. Иркутск, 2006. – 180с
3. Скрипкин А.А., Нецветаев В.А., Щербаков В.Е., Миненко Н.Ю. Получение теплостойких слоев на стали 20 с использованием плазменного нагрева // Сварочное производство, – 1992. № 11. – С.15 – 17.
4. Балановский А.Е., Нестеренко Н.А. Плазменное циклическое упрочнение металлов // Сварочное производство. – 1992. № 11. – С. 13 – 21.
5. Ву Ван Гюи., Балановский А.Е. Пароводянная плазменная цементация в твердой фазе на установке MULTIPLAZ 3500 // Инновации в науке, – 2015. № 51-1. – С. 95 – 102.

6. Чудина О.В. Комбинированные методы поверхностного упрочнения сталей с применением лазерного нагрева. Теория и технология.– М.: МАДИ (ГТУ), 2003. – 248с.
7. Чудина О.В. Комбинированные методы поверхностного упрочнения сталей с применением лазерного нагрева. Теория и технология. М.: МАДИ (ГТУ), 2003. – 248с.
8. Лосинская А. А. Формирование высокоуглеродистых слоев на стали и их закалка с использованием мощного электронного пучка, выведенного в атмосферу// Перспективы науки, –2013. № 10 (49). – С.7 – 10.
9. Галь Н.Р., Рутьков Е.В., Тонтегоде А.Я. Диффузия углерода между объемом и поверхностью(100) молибдена // ЖТФ, – 2002. Т.72. №4. – С.113 – 119.

FORMATION HARDENED LAYER WITH HIGH HARDNESS IN LOW - CARBON STEEL WITH PLASMA SURFACE CARBURIZING

Vu Van Huy, postgraduate student, e – mail: huy241989@gmail.com

Balanovsky A.E. C.Sc. (Engineering), Associate professor, e – mail: fuco.64@mail.ru

Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

Abstract

A new Saturation method of the carbon steel surface under the action of a plasma arc and a new type of graphite coating based on liquid glass for the carburizing process are considered. The microstructure and microhardness of the hardened layer were studied after treatment with this method. It is established that during the time of plasma action 0.1-1с the surface layer is saturated with carbon to the level of white iron concentration. Microstructures and characteristics of the metal surface after plasma carburizing have been studied. The main parameters of the cemented layer are determined: the depth of the cemented layer is 35-2500 μm , the microhardness of up to 12,000 MPa

Keywords: Plasma surface carburizing, microstructure, white cast iron, lath martensite, diffusion, micro-hardness, Visual environment.

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ ЧЕРЕЗ ПРОМЕЖУТОЧНУЮ ВСТАВКУ
СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ**

*НИКУЛИНА А. А., канд. техн. наук, доцент
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Никulina А.А. – 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e – mail: a.nikulina@corp.nstu.ru

Аннотация

В работе представлены результаты исследования микроструктуры и микротвердости соединений разнородных сталей, сформированных сваркой взрывом, которые предполагается использовать в качестве вставки при производстве сварных железнодорожных крестовин. Были рассмотрены вставки, представляющие собой как однородный материал, так и комбинированный (стали 20, Э76 и 12Х18Н10Т). Проведенные исследования показали, что в качестве вставки можно использовать соединение сталей 20 и 12Х18Н10Т, полученное сваркой взрывом. Данное соединение характеризуется минимальным количеством дефектов и закаленных областей в сварном шве.

Ключевые слова: разнородные стали, сварка взрывом, микроструктура, микротвердость.

Введение

Одним из методов соединения трудносвариваемых материалов является технология сварки взрывом [1 – 4]. Ее отличительной особенностью является высокая скорость реализации процесса, что позволяет практически исключить взаимодействие соединяемых материалов. Именно поэтому данным методом можно получить соединения между материалами, которые методами сварки плавлением практически не свариваются.

Примером таких трудносвариваемых материалов является пара углеродистая нелегированная сталь Э76 и высоколегированная сталь 110Г13Л. Низкая свариваемость данных материалов объясняется необходимостью разных условий охлаждения после сварки. Так сталь Э76 необходимо охлаждать с умеренной скоростью для получения перлитной структуры и исключения закалочных структур. Сталь Гадфильда, наоборот, требует ускоренного охлаждения с целью формирования безкарбидной аустенитной структуры. Поскольку одновременно выполнить эти условия не удастся, одним из решений проблемы может являться использование промежуточного слоя из такой стали, которая и при умеренном, и при быстром охлаждении будет обладать структурой, характеризующейся достаточно высокой трещиностойкостью. В случае указанной пары при производстве сварных железнодорожных крестовин в качестве промежуточной вставки используют заготовку из стали 12Х18Н10Т [5], таким образом, формируется комбинированное соединение, включающее два сварных шва (рис. 1).

Ранее проведенные исследования [6 – 10] показали, что и с использованием вставки из хромоникелевой стали сварной шов между заготовками из сталей Э76 и 12Х18Н10Т характеризуется достаточно низкой трещиностойкостью, что объясняется формированием закаленных структур в виде непрерывной прослойки вдоль видимой границы соединения сталей, а также локализованных областей.

Снизить объемную долю образующегося мартенсита и его микротвердость возможно с помощью дополнительных низкоуглеродистых вставок без изменения существующей технологии получения сварных крестовин [11], а также применением других способов сварки, например, взрывом, где взаимодействие свариваемых материалов минимальное. При этом формирование второго шва также комбинированной конструкции может происходить с применением стыковой контактной сварки.

Целью работы являлось изучение структуры сварных швов, полученных между заготовками из разнородных сталей, сформированные сваркой взрывом.

Материалы и методы исследования

В качестве свариваемых сталей были выбраны те же стали, что используются при производстве сварных железнодорожных крестовин. Химический состав сталей представлен в таблице.



Рис. 1. Комбинированное сварное соединение, полученное стыковой контактной сваркой при производстве сварных крестовин:
1 – сталь Гадфильда; 2 – сталь Э76; 3 – сталь 12Х18Н10Т

Химический состав используемых сталей

| Сталь | Химический состав, % | | | | | | | |
|-----------|----------------------|-------|------|------|------|------|-------|-------|
| | С | Mn | Si | Cr | Ni | Ti | P | S |
| 110Г13Л | 1,02 | 15,20 | 0,76 | - | - | - | 0,057 | 0,014 |
| Э76 | 0,72 | 0,78 | 0,25 | - | - | - | 0,020 | 0,012 |
| 12Х18Н10Т | 0,11 | 0,58 | 0,53 | 14,1 | 8,7 | 0,38 | 0,021 | 0,012 |
| 20 | 0,17 | 0,50 | 0,30 | 0,22 | 0,21 | - | 0,035 | 0,035 |

Особенности сварки взрывом не позволяют сваривать непосредственно литой сердечник с массивными рельсовыми окончаниями. Поэтому было предложено осуществлять сварку в два этапа. На первом этапе к сердечнику из стали 110Г13Л методом сварки взрывом приваривается промежуточная вставка, а на втором – к свободному торцу вставки методом стыковой контактной сварки оплавлением приваривается рельсовое окончание.

Причем рассматривалось несколько вариантов комбинированных соединений - как с однородной, так и комплексной вставкой, состоящей из нескольких сталей. В качестве дополнительного слоя во вставке было предложено использовать низкоуглеродистую сталь 20 на основе результатов работы [11]. Толщина вставки, в общем, составляла 10 мм. Схема сварки взрывом представлена на рис. 2. Вставку располагали под углом к поверхности сердечника. На поверхности вставки размещали слой взрывчатого вещества, в качестве которого использовали гексоген плотностью $1,0 \text{ г/см}^3$.

Структурные исследования проводились с использованием светового микроскопа Carl Zeiss AxioObserver A1m и растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 XVP. Объектами служили шлифы образцов, подготовленные по стандартной технологии шлифования и полирования. В качестве химических травителей применяли пятипроцентный раствор азотной кислоты в этиловом спирте, а также смесь азотной HNO_3 (1 объём) и соляной HCl (3 объёма) кислот [12].

Результаты и обсуждение

Анализ результатов структурных исследований образцов, полученных сваркой взрывом стали Гадфильда и стали 20, показал, что в зоне соединения разнородных сталей наблюдается типичная для сварки взрывом граница (рис. 3 а). При сварке поверхностные слои соединяемых заготовок испытывают значительную пластическую деформацию, в результате чего изменяется морфология ферритных зерен (рис. 3 б). Деформация стали Гадфильда сопровождается образованием большого количества явно выраженных линий скольжения (рис. 4 а). Кроме того, наблюдается формирование новых зерен (рис. 4 б). Однако в сварном шве можно заметить

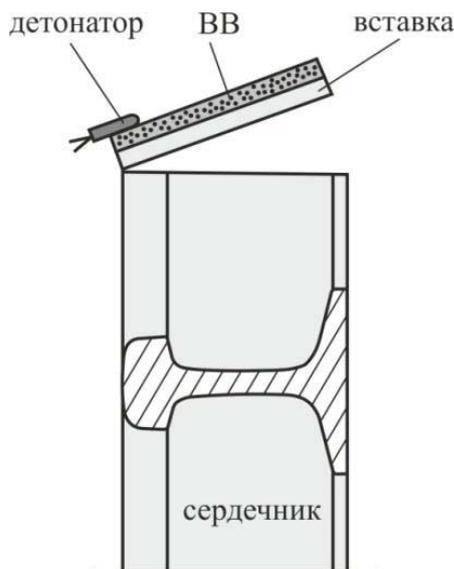


Рис. 2. Схема сварки взрывом литого сердечника и вставки. ВВ – взрывчатое вещество

многочисленные трещины, которые располагаются в высокомарганцовистой стали (рис. 5). Также некоторые участки, располагающиеся в непосредственной близости от сварного шва, в момент сварки находились в расплавленном состоянии, что привело к формированию пор при кристаллизации.

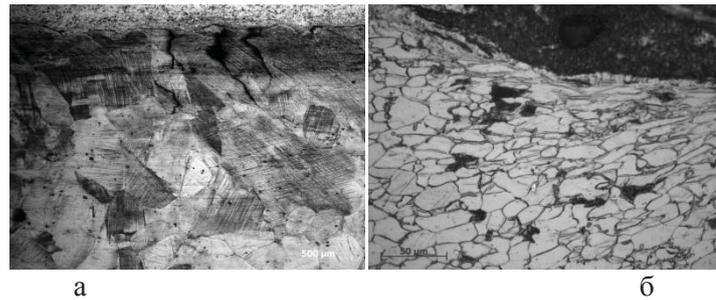


Рис. 3. Сварка взрывом стали 20 и стали Гадфильда:
а – общий вид зоны соединения; б – деформация ферритных зерен

Результаты измерения микротвердости шва между сталью 20 и сталью Гадфильда, полученного сваркой взрывом, представлены на рис. 6. Анализ представленных кривых свидетельствует о том, что максимальный уровень твердости в низкоуглеродистой стали составляет ~ 4500...5000 МПа. Эти значения соответствуют мартенситным участкам в переходной зоне сварного шва. Слои стали Гадфильда, расположенные вблизи сварного шва упрочнены примерно до такого же уровня. Причина упрочнения носит деформационный характер и вызвана резким увеличением плотности дислокаций, дефектов упаковки и двойников в аустенитных зернах. Явление наклепа стали Гадфильда в холодном состоянии хорошо известно и широко используется в практических целях.

Таким образом, проводить непосредственно сварку взрывом стали Гадфильда со вставкой нежелательно, т.к. сварное соединение характеризуется наличием трещин.

Сварной шов при сварке взрывом сталей 20 и 12Х18Н10Т имеет характерный вид.

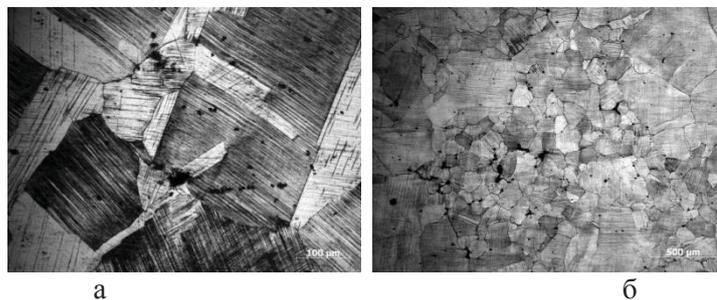


Рис. 4. Линии деформации (а) и зона неполной рекристаллизации (б)
в стали Гадфильда после сварки взрывом



Рис. 5. Дефекты в стали Гадфильда после сварки взрывом

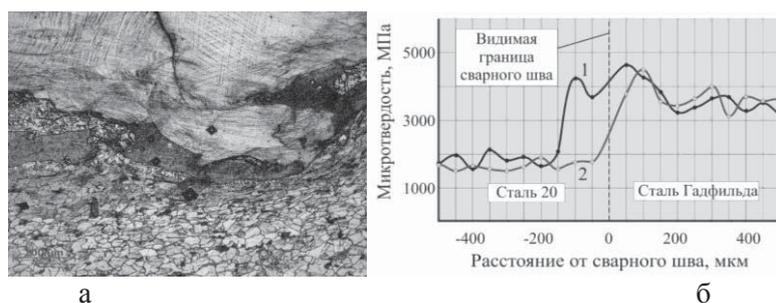


Рис. 6. Микротвердость сварного соединения «сталь 110Г13Л – сталь 20»: 1 – проходит через закаленную зону; 2 – не проходит через закаленную зону

Дефектов не наблюдается. В хромоникелевой стали в результате значительных степеней деформации формируются линии скольжения и двойники. Также как и при сварке взрывом сталей Гадфильда и углеродистой стали, в данном случае формируются зоны с мартенситной структурой, что подтверждается результатами дюрометрических испытаний, представленных на рис. 7, однако уровень микротвердости незначительно превышает 3000 МПа. Можно отметить, что полученное сварное соединение не имеет дефектов в виде трещин, что объясняется лучшей свариваемостью стали 20 и 12Х18Н10Т.

Для исключения диффузии углерода в хромоникелевую сталь возможно использование прослойки «сталь 20 – сталь Э76», полученную сваркой взрывом. Полученный сварной шов представлен на рис. 8 а. Из трех вариантов сварки данное соединение характеризуется наиболее правильным профилем волн в сварном шве. Однако в данном случае формируется большее число закаленных участков (рис. 8 б), которые образуются как со стороны рельсовой стали, так и стали 20. На небольшом удалении от шва наблюдается область мелких рекристаллизованных зерен. Деформация ферритных зерен наиболее существенна в гребне волны (рис. 8 б). На расстоянии 100 – 300 мкм от зоны соединения ферритные зерна деформированы не существенно, однако в них наблюдаются двойники, что свидетельствует о не дислокационном характере деформации.

Дюрометрические исследования показали, что уровень микротвердости закаленных участков в рельсовой стали может достигать 6000 МПа (рис. 9, кривая 1). Для стали 20 уже характерны значения 3500 – 4000 МПа (рис. 9, кривая 2).

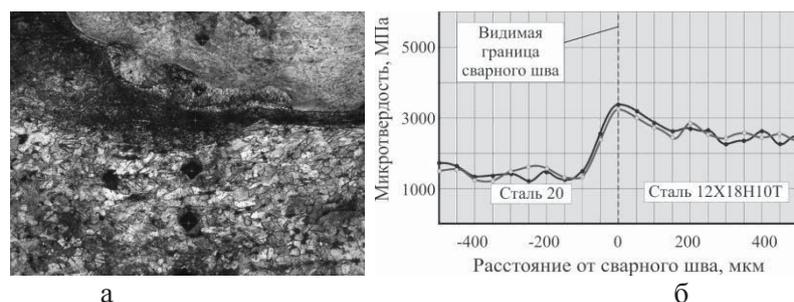


Рис. 7. Микротвердость различных участков сварного соединения между сталями 20 и 12Х18Н10Т, полученного сваркой взрывом: а – отпечатки алмазной пирамидки; б – распределение микротвердости

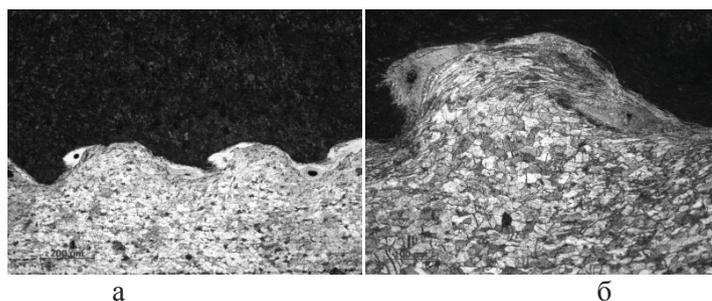


Рис. 8. Соединение «сталь 20 – сталь Э76», полученное сваркой взрывом (а) и сформировавшиеся закаленные зоны (б)

Выводы

Были проведены структурные исследования сварных соединений, полученных сваркой взрывом, используемых для промежуточной вставки при производстве сварных железнодорожных крестовин. Исследования сварных швов, полученных сваркой взрывом крестовины и вставки из стали 20, показали, что соединение характеризуется наличием трещин в стали 110Г13Л. Результаты исследований комбинированных вставок, состоящих из сталей 20, Э76 и 12Х18Н10Т, свидетельствуют о том, что в качестве вставки можно использовать соединение сталей 20 и 12Х18Н10Т. Данное соединение характеризуется минимальным количеством дефектов и закаленных областей в сварном шве.

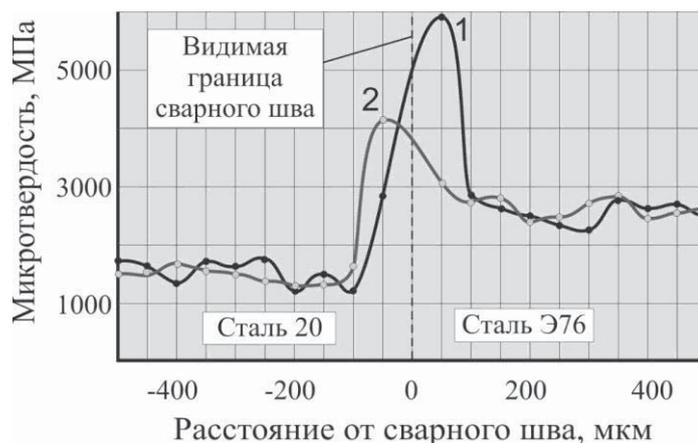


Рис. 9. Микротвердость сварного шва «сталь 20 – сталь Э76»:

- 1 – дорожка микротвердости, проходящая через закаленную зону в рельсовой стали;
2 – дорожка микротвердости, проходящая через закаленную зону в стали 20

Список литературы

1. Фетисов Г.П. *Материаловедение и технология металлов*. - М.: Высшая школа, 2000. 638 с.
2. Трыков Ю.П., Трудов А.Ф., Клочков С.В. Влияние термообработки на свойства сваренного взрывом биметалла из разнородных сталей // *Известия вузов. Черная металлургия*, 2007. № 9. С. 62.
3. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Покатаев Е.П. Изменение во времени прочности сваренных взрывом соединений // *Деформация и разрушение материалов*, 2006. № 10. С. 27 – 31.

4. Трудов А.Ф., Трыков Ю.П., Клочков С.В., Донцов Д.Ю., Войнов М.О. Влияние термообработки на структурно-механическую неоднородность сваренного взрывом биметалла Ст3+12Х18Н10Т // Деформация и разрушение материалов. 2009. № 12. С. 41 – 44.
5. Пат. 1819305 СССР, МКИ5 E01B11/44. Способ соединения деталей стрелки. Заявитель и патентообладатель Фюест Альпине Айзенбанзюстеме ГмБХ (АТ). - № 5001090/11; заявл. 19.07.91; опубл. 30.05.93, Бюл. № 20. 2 с.
6. Генкин И.З. Сварные рельсы и стрелочные переводы // Путь и путевое хозяйство, 2000. № 12. С. 14 – 20.
7. Mianhuan. G., Ruchun W., Fu W., Wanhai Z., Weidong W. Welding of Railway Rail and High Manganese Steel Frog/ // Transactions of the china welding institution, 2002. V. 6. pp. 25 – 28.
8. Zhang F., Lv B., Hu B., Li Y. Flash butt welding of high manganese steel crossing and carbon steel rail // Materials Science and Engineering: A, 2007. V. 454 – 455. pp. 288 – 292.
9. Кучук-Яценко С.И., Швец Ю.В., Дидковский А.В. Технология и оборудование для контактной стыковой сварки железнодорожных крестовин с рельсовыми окончаниями через аустенитную вставку // Сварочное производство. 2007. № 7. С. 29 – 32.
10. Никулина А.А., Батаев А.А., Смирнов А.И. Структурные исследования сварных швов, полученных методом стыковой контактной сварки заготовок из разнородных сталей // Обработка металлов, 2010. №. 2(47) С. 23 – 28.
11. Пат. 2361030 Российская Федерация. Способ сварного соединения крестовины из марганцовистой стали с рельсом из углеродистой стали / А.А. Батаев, В. А. Батаев, В.Г. Буров, А.А. Никулина, Е.Е. Захаревич, И.А. Батаев, Е.Д. Головин, А.Ю. Огнев, Г.П. Ильин, В.Ф. Ежак, С.В. Хлебников // Бюллетень. – 2009. № 19.
12. Коваленко В.С. Металлографические реактивы: Справочник.– М.: Металлургия, 1981. 121 с.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF DISSIMILAR STEELS JOINTS OBTAINED THROUGH AN INTERMEDIATE INSERT BY EXPLOSON WELDING

Nikulina Aelita, Ph.D. (Engineering), Associate professor, e – mail: a.nikulina@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia

Abstract

The paper presents the results of the microstructure and microhardness study of dissimilar steels joints formed by explosion welding which are intended to be used as an insert during production of welded railroad frogs. Inserts representing both homogeneous and complex material (low-carbon, high-carbon and chromium-nickel steels) were investigated. The presence of cracks in high-manganese steel in the welded joints between frog and insert of steel 20 obtained by explosion welding was revealed. It was shown that joints of low-carbon and chromium-nickel steels produced by explosion welding may be used as inserts. These joints have minimal quantity of defects and quenched areas in the weld.

Keywords: heterogeneous steels, welding, microstructure, microhardness.

УДК 621.9

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ
3D – ПЕЧАТЮ НА СЖАТИЕ**

*БАЛАШОВ А. В.*¹, канд. техн. наук, доцент,
*БЕЛОПЛОТОВ С. В.*¹,
*МАЛЫШЕВ С. О.*², инженер,
*НОВИКОВСКИЙ Е. А.*¹, инженер,
*ИКОННИКОВ А. М.*¹, канд. техн. наук, доцент,
*ФЁДОРОВ В. А.*², канд. техн. наук, доцент

(АлтГТУ, Центр молодежного инновационного творчества «Ползунов» г. Барнаул)

Балашов А.В. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
е – mail: bavagtu@mail.ru

Фёдоров В.А. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
ЦМИТ «Ползунов»,
е – mail: fvaagtu@mail.ru

Аннотация

Рассмотрен экструзионный метод 3D – печати. Исследовано влияние процента заполнения материалом детали на напряжение при сжатии. Установлена зависимость напряжения при сжатии при установленной относительной деформации – 10 % деталей из ABS пластика от заполнения материала при шестигранной внутренней структуре. Установленная зависимость напряжения при сжатии изделий из термопластика ABS может использоваться для проектирования изделий, которые будут изготавливаться методом экструзионной 3D – печати.

Ключевые слова: 3D-печать, экструзионный метод, ABS пластик, напряжение при сжатии, процент заполнения, относительная деформация.

Введение

В настоящее время начинает распространяться новый метод получения деталей – 3D печать. Процесс создания цельных трехмерных объектов практически любой геометрической формы на основе цифровой модели называют «аддитивным производством» или 3D-печатью. 3D – печать основана на концепции построения объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры модели.

Одним из распространенных методов 3D-печати является – экструзионный. При этом методе нить из термопластика (полилактид (PLA), акрилонитрил – бутадиенстирол (ABS) и др.) 2 подается в печатающую головку 1, где разогревается и выдавливается через экструдер на подвижную платформу 3D – принтера (рис. 1).

Для применения этого метода в машиностроении необходимо изучить влияние режимов печати на параметры качества, полученных изделий [1 – 4].

Для изучения влияния структуры изделий, полученных 3D-печатью проведены испытания на сжатия. Испытания на изгиб проводились в соответствии с ГОСТ 4651 – 82 "Пластмассы. Метод испытания на сжатие".

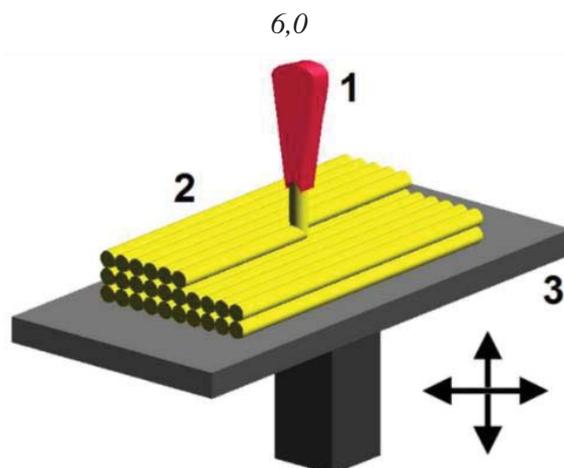


Рис. 1. Схема работы 3D – принтера

Описание экспериментальных исследований

По рассмотренной технологии напечатаны образцы 50×50×50 мм из пластика – ABS F133 на 3D принтере MakerBot Replicator 2X (рис. 2).



Рис. 2. 3D – принтер MakerBot Replicator 2X

Образцы печатались при следующих режимах: тип; диаметр сопла экструдера — 0,4 мм; высота слоев - 0,25 мм; температура экструдера — 230° С; температура стола — 120° С; скорость печати 90 мм/с; толщина периметра образца – 1,6 мм, формирование слоёв с внутренним заполнением материала 20, 40, 60, 80 %, структура слоев – шестигранник (рис. 3).

Далее образцы испытывались на изгиб на испытательной установке INSTRON 3369 (рисунок 4). Метод основан на нагружении испытуемого образца сжимающей возрастающей нагрузкой при установленной скорости деформирования. В соответствии с ГОСТ 4651 – 82 определяли напряжение сжатия при установленной относительной деформации – 10 %.



а – структура образцов



б – образцы для испытания на сжатие

Рис. 3. Образцы для испытания на сжатие



а – испытательная установка
INSTRON 3369



б – нагружение образца

Рис. 4. Испытания на изгиб

Результаты испытания образцов на сжатие приведены на рис. 5

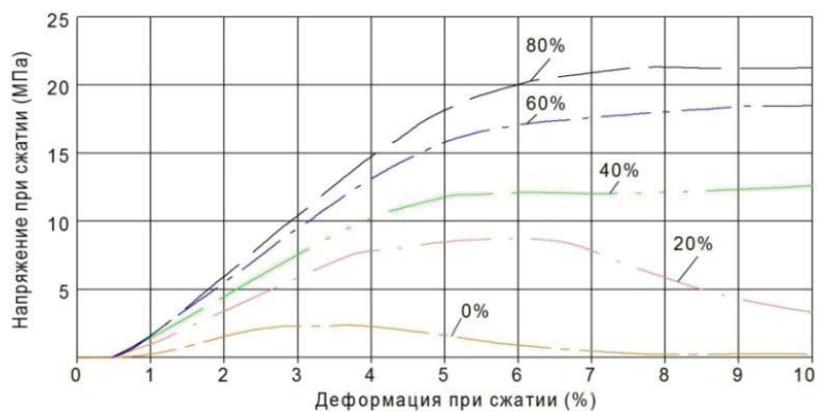


Рис. 5. Диаграмма сжатия образцов с процентом заполнения 0, 20, 40, 60, 80 %

Результаты и обсуждение

Результаты обработки экспериментальных данных выявили, зависимость напряжения сжатия при установленной относительной деформации – 10% от заполнения материалом (рис. 6).

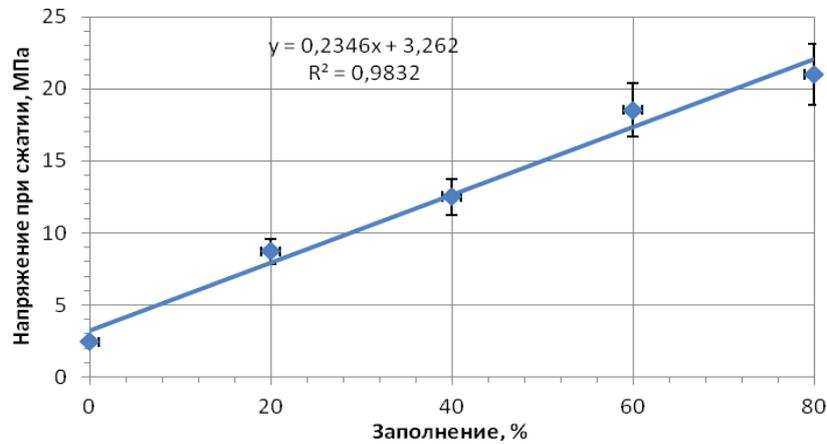


Рис. 6. Зависимость максимального напряжения при сжатии при относительной деформации 10 % от заполнения материалом детали

Зависимость влияния процента заполнения материала по шестиугольной схеме на напряжение при сжатии описывается уравнением 1.

$$\sigma_{сд6} = 0,2346 \cdot \theta + 3,262 \quad (1)$$

где – $\sigma_{сд6}$ – напряжение сжатия образца, заполненный по шестиугольной схеме при установленной относительной деформации – 10 %;
 θ – процент заполнения материала.

Выводы

Установлена зависимость напряжения при сжатии при установленной относительной деформации – 10 % деталей из ABS пластика от заполнения материала при шестигранной внутренней структуре.

Установленная зависимость напряжения при сжатии изделий из термопластика ABS может использоваться для проектирования изделий, которые будут изготавливаться методом экструзионной 3D – печати.

Список литературы

1. Белоплов С.В. Исследование прочности изделий, полученных методом 3D-печати / Белоплов С.В., Потапов И.С., Черданцев А.О., Балашов А.В., Новиковский Е.А./ В сборнике: Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы - перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов сборник научных статей II Между-

народной молодежной научно-технической конференции: в 2 томах. 2016., Юго-Западный государственный университет, г. Курск. С. 45 – 49.

2. Балашов А.В. Исследование прочности изделий, полученных методом 3D-печати /Балашов А.В., Черданцев А.О., Новиковский Е.А., Ананьин С.В., Белоплов С.В./ Ползуновский вестник. 2016. № 2. С. 61 – 64.

3. Белоплов С.В. Изготовление литейной модели методом 3D печати/Белоплов С.В., Балашов А.В., Черданцев А.О., Новиковский Е.А., Заборцева М.Н./Ползуновский альманах. 2016. № 4. С. 12 – 18.

4. Балашов А.В. Исследование свойств изделий, полученных 3D-печатью / Балашов А.В., Белоплов С.В., Малышев С.О., Новиковский Е.А., Фёдоров В.А./ Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Том 4 № 2. С. 120 – 126.

RESEARCH OF PROPERTIES OF THE PRODUCTS RECEIVED 3D – PRINTING ON COMPRESSION

Balashov A.V.¹, C.Sc/ (Engineering), Associate professor, e – mail: bavagtu@mail.ru

Beloplotov S.V.¹, student, e – mail: kydstepka@gmail.com

Malushev S.O.², engineer, e – mail: 22unbb@gmail.com

Novikovskiy E.A.¹, engineer

Ikonnikov A.V.¹, C.Sc/ (Engineering), Associate professor, e – mail: iamagtu@mail.ru

Fedorov V.A.², C.Sc/ (Engineering), Associate professor, e – mail: fvaagtu@mail.ru

¹Polzunov Altai State Technical University, Lenin prospect, 46, Barnaul, Russian Federation

²Center of youth innovative creativity «Polzunov», Lenin prospect, 46, Barnaul, Russian Federation

Abstract

The extrusive method 3D - printing. Influence of percent of filling with detail material on strength at compression is investigated. Dependence of strength on compression of details from ABS plastic from filling of material at six-sided internal structure is established. The established dependence of strength at compression of products from ABS thermoplastic can be used for design of products which will be made by method extrusive 3D – the press.

Keywords: 3D - printing, an extrusive method, ABS plastic, strength at compression, filling percent, internal structure.

УДК 546.261

**СИНТЕЗ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ НЕКОТОРЫХ
ТУГОПЛАВКИХ СОЕДИНЕНИЙ**

*КРУТСКИЙ Ю. Л., канд. техн. наук, доцент,
КВАШИНА Т. С., магистрант 1 года обучения,
ЧУШЕНКОВ В. И., магистрант 1 года обучения,
ЛОЖКИНА Е. А., студентка 4 курса
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Крутский Ю.Л. – 630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: j_krutskii@rambler.ru

Аннотация

Представлены результаты исследования процессов синтеза карбидов титана, кремния, хрома, циркония, а также диборида хрома путем восстановления соответствующих оксидов нановолокнистым углеродом. Изучены некоторые характеристики и свойства полученных материалов. Все они однофазны и состоят из карбидов TiC, SiC, Cr₃C₂, ZrC и борида CrB₂ микронных размеров.

Ключевые слова: карбид титана, карбид кремния, карбид хрома, карбид циркония, диборид хрома, нановолокнистый углерод.

Введение

Промышленное применение карбидов титана, кремния, хрома, циркония, а также диборида хрома основано на их тугоплавкости, высоких значениях твердости, теплопроводности, а также стойкости в агрессивных средах [1]. О важности их в современной технике свидетельствует значительное количество публикаций. Традиционный метод получения карбидов в порошкообразном состоянии – карботермическое восстановление оксидов, диборида хрома – карбидоборное восстановление с использованием в качестве углеродного материала сажи или графита. Нановолокнистый углерод (НВУ), технология получения которого реализована на кафедре химии и химической технологии НГТУ, характеризуется незначительным содержанием примесей и высоким значением удельной поверхности (140 – 160 м²/г) [2] и по этим причинам является перспективным углеродным материалом для синтеза вышеуказанных соединений в виде высокодисперсных порошков.

Данная работа посвящена исследованию процессов синтеза карбидов титана, кремния, хрома, циркония и диборида хрома при использовании в качестве восстановителя и карбидообразующего материала НВУ. Актуальность темы подтверждается наличием в базе данных электронной информационно-поисковой системы SciFinder производства химической реферативной службы (Chemical Abstracts Service) 5755 публикаций, имеющих отношение к синтезу этих соединений, и 11457 – к их применению. Большое внимание уделяется получению их в виде нанопорошков. Однако немаловажное значение имеет и разработка процессов синтеза безразмольных порошков микронных размеров этих материалов.

Ни в одной из статей, относящихся к получению этих соединений, в качестве углеродного материала НВУ не применялся. В то же время установлено, что НВУ является эффективным реагентом для синтеза, например, высокодисперсного карбида бора [3].

Материалы и методы исследования

В качестве восстановителя использовался гранулированный нановолокнистый углерод. Размер гранул варьировался в диапазоне 4 – 8 мкм. Гранулы НВУ образованы плотно переплетенными волокнами с диаметром 30 – 100 нм. Гранулы сравнительно легко растираются в порошок. НВУ достаточно чист: находящиеся в нем примеси представляют собой остатки исходного катализатора (90 % Ni/10 % Al₂O₃); их содержание не превышает 1 %.

Для приготовления шихт использовались оксиды титана, кремния, хрома и циркония, а также НВУ (растертый в порошок и просеянный через сито – 100 мкм).

Шихты для получения тугоплавких соединений готовились по стехиометрии реакций:



Синтез карбидов титана и циркония проводился в печи сопротивления с углеродным нагревателем, а карбидов кремния и хрома, а также диборида хрома – в индукционной печи тигельного типа в среде аргона. Степень полноты прохождения реакций определялась сравнением расчетной и экспериментальной убыли массы. Установлено, оптимальными температурами синтеза являются, °С: для карбида титана 1900 – 2000, карбида кремния 1800 – 1900, карбида хрома 1300 – 1400, карбида циркония 2000 – 2100, диборида хрома 1700.

Полученные образцы исследовались с привлечением рентгенофазового (РФА) и рентгеноспектрального флуоресцентного анализов, пикнометрического метода, растровой электронной микроскопии (РЭМ), низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ), седиментационного анализа, термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии. Также было проведено определение общего углерода в синтезированных образцах. Была изучена стойкость их в растворе серной кислоты.

Результаты

По данным РФА установлено, что продукты реакции во всех случаях однофазны и содержат карбиды TiC, SiC, Cr₃C₂, ZrC и CrB₂. Содержание основных элементов и углерода близко к расчетному. Частицы полученных порошков имеют неправильную форму с сопоставимыми размерами во всех измерениях (2 – 5 мкм) и частично агрегированы. По данным седиментационного анализа средние размеры частиц/агрегатов находятся в пределах 5 – 10 мкм. Частицы/агрегаты имеют широкий диапазон распределения по размерам («poorly sorted»). Плотность образцов карбидов близка к приведенной в справочной литературе.

Результаты определения текстурных характеристик представлены в табл. 1.

Тугоплавкие соединения и изделия из них обычно эксплуатируются в экстремальных условиях, в том числе и в окислительных средах. Поэтому стойкость их к действию кислорода при повышенных температурах является важным свойством. Результаты термического анализа приведены в табл. 2.

Таким образом, при достижении температуры 1100° С карбид кремния не окисляется вообще, карбид титана окисляется частично, а остальные карбиды – практически полностью, а в свою очередь диборид хрома при температуре в 1000° С окисляется на 44 %. Все изученные карбиды стойки к действию серной кислоты концентрации 1:4 (количество нерастворимого остатка находится на уровне 99 %), в то время как диборид хрома эффективно сопротивляется воздействию 5 % и 20 % раствора NaOH, а также концентрированной азотной кислоте

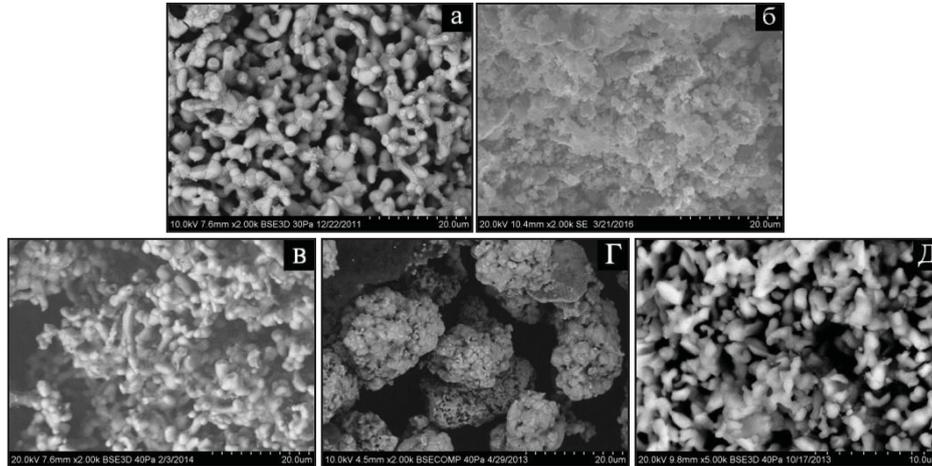


Рис. 1. Результаты сканирующей электронной микроскопии:
а – TiC; б – SiC; в - Cr₃C₂; г – ZrC; д – CrB₂

Таблица 1

Текстурные характеристики образцов карбидов

| Карбид | Температура синтеза, °С | Удельная поверхность, м ² /г | Удельный объем пор, см ³ /г | Средний диаметр пор, нм |
|--------------------------------|-------------------------|---|--|-------------------------|
| TiC | 1900 | 2,0 | 0,0090 | 18,8 |
| SiC | 1800 | 19,5 | 0,0730 | 15,0 |
| Cr ₃ C ₂ | 1300 | 1,2 | 0,0030 | 11,3 |
| ZrC | 2000 | 2,8 | 0,0090 | 11,2 |
| CrB ₂ | 1700 | 2,2 | 0,0043 | 8,5 |

Таблица 2

Результаты термического анализа

| Образец | Прирост массы, % | | Температура начала окисления, °С |
|--------------------------------|-------------------|-----------|----------------------------------|
| | Экспериментальный | Расчетный | |
| TiC | 17,3 | 33,3 | 450 |
| SiC | - | 50,0 | - |
| Cr ₃ C ₂ | 27,0 | 27,8 | 560 |
| ZrC | 19,4 | 18,8 | 480 |
| CrB ₂ | 44,0 | 97,3 | 498 |

Таким образом, по стойкости к действию агрессивных сред полученные порошки карбидов микронных размеров сопоставимы с со стойкостью крупнозернистых порошков этих соединений.

Предварительные технико – экономические расчеты показали, что цена полученных карбидов в 2 – 3 раза ниже цен зарубежных поставщиков (группа компаний «Goodfellow») аналогичной продукции.

Выводы

Полученные соединения характеризуются высокой чистотой (содержание примесей 2 – 2,5 %). Размеры частиц составляют около 5 – 7 мкм. Частицы преимущественно агрегированы. Распределение частиц по размерам очень широкое, что характерно для соединений, полученных по химическим реакциям.

Подводя общий итог, можно заключить, что нановолокнистый углерод является очень важным и перспективным материалом для синтеза вышеуказанных порошков в одну стадию.

Список литературы

1. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений: Справочное издание / Под ред. Т.Я. Косолаповой. – М.: Металлургия, 1986. – 928 с.
2. G.G. Kuvshinov, Yu.I. Mogilnykh, D.G. Kuvshinov, D.Yu. Yermakov, M.A. Yermakova, A.N. Salanov, N.A. Rudina. Mechanism of Porous Filamentous Carbon Granule Formation on Catalytic Hydrocarbon Decomposition. Carbon 37 (1999), pp.1239 – 1246.
3. Крутский Ю.Л., Баннов А.Г., Соколов В.В., Шинкарев В.В., Ухина А.В., Максимовский Е.А., Пичугин А.Ю., Соловьев Е.А., Дюкова К.Д., Крутская Т.М., Кувшинов Г.Г. Синтез высокодисперсного карбида бора из нановолокнистого углерода // Российские нанотехнологии. 2013. №3-4. С. 21 – 27.

THE SYNTHESIS OF FINE – DISPERSED POWDERS OF SOME HIGH – MELTING COMPOUNDS

Krutskiy Yu.L. C.Sc. (Engineering), associate professor, e – mail: j_krutskii@rambler.ru

Kvashina T.S., graduate student, e – mail: k.tatiana3105@gmail.com

Chushenkov V.I., graduate student, e – mail: chushenkov.vladislav@mail.ru

Lozhkina E.A., undergraduate student, e – mail: mearies@inbox.ru

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia

Abstract

The paper reviews the results of the research of the synthesis of titanium, silicon, chromium, zirconium carbides and chromium diboride by reduction of the appropriate oxides by means of carbon nanofibers (CNFs). All the compounds are single-phase powders of TiC, SiC, Cr₃C₂, ZrC and CrB₂. The size of particles was about several microns.

Keywords: titanium carbide, silicon carbide, chromium carbide, zirconium carbide, chromium diboride, carbon nanofibers.

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАПЛАВКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ СВАРНЫХ КРЕСТОВИН**

*ОХРЕМЕНКО А. А. студент
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Охременко А.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск,
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: anjutka-syromjatnikova@yandex.ru

Аннотация

Данная работа посвящена сравнению технологий сварки и наплавки для повышения прочности конструкций железнодорожных крестовин с рельсами, состоящих из разнородных сталей Э76 и 12Х18Н10Т. Главная проблема, возникающая в процессе сварки, связана с образованием трещин, обусловленная образованием структур мартенситного типа. Для исследования были использованы методы световой микроскопии, измерение микротвердости по методу Виккерса. По результатам структурных исследований можно сделать вывод, что наплавка, несмотря на наличие мартенсита, повышает надежность конструкций, так как объемная доля высокопрочных структур ниже, чем при использовании технологии сварки.

Ключевые слова: разнородные стали, контактная сварка, наплавка, микроструктура.

Введение

В настоящее время железные дороги занимают огромное место в жизни России, так как стали главным видом грузового и пассажирского транспорта. В связи с необходимостью существенного повышения скорости движения и численности поездов, соответственно, возрастают и требования к надежности важнейших элементов железнодорожного пути, в том числе к стрелочным переводам. Как известно, в стрелочном переводе крестовины представляют собой конструкции железнодорожного пути, имеющие отличительные конструктивные и геометрические особенности, обуславливающие специфику взаимодействия их с подвижным составом. Крестовины изготавливают из стали Гадфильда (110Г13Л), рельсы из стали Э76. На данный момент выпускают сварные крестовины, где элемент крестовины приваривается к рельсовому элементу через вставку из стали 12Х18Н10Т. Присутствие данной вставки обусловлено невозможностью напрямую сваривать данные стали, т.к. после сварки для них необходимо различное охлаждение (для стали Э76 - умеренное, чтобы не получился мартенсит, для стали 110Г13Л – быстрое, чтобы исключить формирование карбидов и карбидной сетки) [1, 2].

Несмотря на то, что технология стыковой контактной сварки на Новосибирском стрелочном заводе отработана, существует ряд проблем, связанных со сваркой элементов из сталей Э76 (рельс) и 12Х18Н10Т (вставка). Вариантами решения данной проблемы является использование дополнительных вставок, направленных на изменение химического состава сварного шва [3, 4], термическая обработка или деформация сварного шва [2, 5], а также применение другой технологии получения соединения [6].

Целью данной работы является повышение надежности конструкций сварных крестовин, состоящих из разнородных сталей, путем использования технологии наплавки. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: исследование структуры образцов, полученных с исполь-

зованием сварки; исследование структуры образцов, полученных с использованием наплавки; оценка микротвердости; оценка надежности конструкций.

Материалы и методы исследования

В данной работе были исследованы образцы после стыковой контактной сварки, вырезанные в зоне сварных швов между углеродистой и хромоникелевой сталями. Для сварки был использован следующий режим: напряжение 380 В, давление – 16 МПа, усилие осадки - 770 кН, время осадки общее – 3 с, время осадки под током – 0,5 с.

Образцы после наплавки также вырезались из готового комбинированного соединения, в котором один шов был получен наплавкой (стали Э76 и 12Х18Н10Т), а второй – стыковой контактной сваркой (стали 12Х18Н10Т и 110Г13Л). Наплавка производилась на установке РК757 – Н с использованием двух режимов. Первые три слоя ток – 160 ампер, напряжение – 18 вольт, 4 – 7 слой ток – 210 ампер, напряжение – 23,3 вольт.

В работе применялись такие методы исследования как световая металлография и оценка микротвердости по методу Виккерса. Для исследований использовали световой микроскоп Carl Zeiss AxioObserver Alm и твердомер для проведения испытаний по Виккерсу 402MVD.

Результаты и обсуждение

Структурные исследования образцов и оценка результатов микротвердости выявили следующее. Главная проблема, возникающая в процессе сварки, связана с образованием трещин. Возникают эти дефекты между рельсовой сталью и хромоникелевой вставкой. Основную роль в формировании неблагоприятной структуры играет диффузия углерода из рельсовой стали и хрома из стали 12Х18Н10Т в зону сварного шва. За счет этого в рельсовой стали образуются области, насыщенные хромом, а в хромоникелевой - углеродом, что приводит к появлению мартенситной структуры даже при медленном охлаждении (рис. 1). Такая структура переходной зоны сварного шва между рельсовым окончанием и хромоникелевой вставкой обуславливает возможность проявления различных механизмов разрушения при динамической нагрузке [7 – 13]. Ширина мартенситной прослойки составляет 250 – 300 мкм.

Технологией, используемой для сравнения, являлась наплавка. В данном случае граница переходной зоны более ровная и четко прослеживается. Мартенсит присутствует, но в меньшем объеме (рис. 2). Кроме того, он не образует непрерывной прослойки. Максимальная ширина участков мартенсита достигает 50 мкм.

Результаты оценки микротвердости полностью подтвердили наличие мартенситных зон. В сварных швах в зоне видимой границы уровень микротвердости максимален и достигает 4000 – 5500 МПа, в то время когда микротвердость исходного материала составляет 2500 – 3300 МПа. После наплавки высокий уровень микротвердости достигается лишь непосредственно на границе соединения (рис. 3).

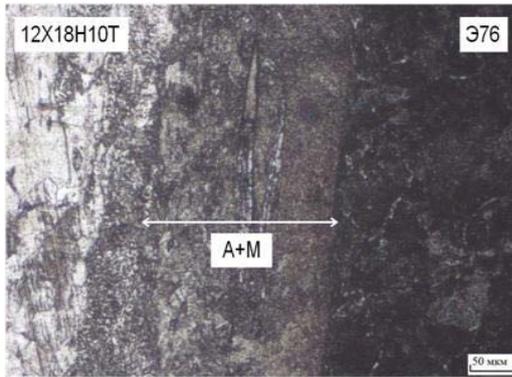


Рис. 1. Структура сварного шва между заготовками из сталей Э76 и 12X18H10T

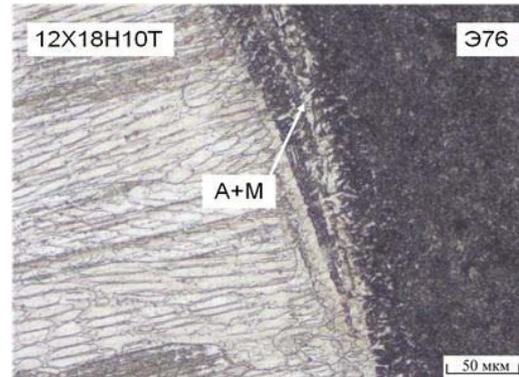


Рис. 2. Общий вид структуры, сформировавшейся после наплавки стали 12X18H10T на заготовку из стали Э76



Рис. 3. Распределение микротвердости на границе взаимодействия разнородных сталей

Выводы

В работе были исследованы соединения сталей Э76 и 12X18H10T, полученные стыковой контактной сваркой и наплавкой. Проведенные исследования показали, что ширина переходной зоны при сварке составляет 250 – 300 мкм, при наплавке 50 мкм. При сварке образуется мартенситная прослойка, что существенно может снизить надежность сварного соединения. При наплавке мартенситная прослойка не выявлена, однако встречаются области высокопрочных структур в переходной зоне.

Максимальный уровень микротвердости в переходной области при сварке составляет 5400 МПа, при наплавке 5000 МПа.

Таким образом, можно сделать вывод, что наплавка, несмотря на наличие мартенсита, повышает надежность конструкций, так как объемная доля высокопрочных структур ниже, чем при использовании технологии сварки.

Список литературы

1. Никулина А.А. Повышение конструктивной прочности сварных стыков между рельсовыми окончаниями и литыми сердечниками железнодорожных стрелочных переводов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Новосибирский государственный технический университет. - Новосибирск, 2007. 186 с.
2. Пат. 1819305 СССР, МКИ⁵ E01B11/44. Способ соединения деталей стрелки / Йоханесс Блумауер; заявитель и патентообладатель Фёст-Альпине Айзенбанзюстеме ГмбХ (АТ). - № 5001090/11; заявл. 19.07.91; опубл. 30.05.93, Бюл. № 20. – 2 с.
3. Патент 2361030 Российская Федерация. Способ сварного соединения крестовины из марганцовистой стали с рельсом из углеродистой стали / А.А. Батаев, В. А. Батаев, В.Г. Буров, А.А. Никулина, Е.Е. Захаревич, И.А. Батаев, Е.Д. Головин, А.Ю. Огнев, Г.П. Ильин, В.Ф. Ежак, С.В. Хлебников // Бюллетень. – 2009. № 19.
4. Pat. 04-046686 B23K20/00. Method for joining high manganese steel material and high carbon steel material. Application number 02-152539, Date of filing 13.06.1990, Applicant KOMATSU LTD. Date of publication 17.02.92, № 10. 3 p.
5. Пат. 96124666 Российская федерация МПК6 B23L9/00. Способ соединения изделия из высокоуглеродистой стали с изделием из высокомарганцовистой стали / Аптекарь Н.М. (РФ) – № 96124666/02; заявл. 31.12.1996; опубл. 10.03.1999. – 2 с.
6. Пат. 1815071 СССР МКИ5 B23 K 11/04. Способ контактной стыковой сварки оплавлением / И.З. Генкин, С.И. Кучук-Яценко, Е.А. Шур (СССР). - № 4873427/08; заявл.06.09.90; опубл. 15.05.93, Бюл. № 18. – 2 с.
7. Бивалькевич А.А., Батаев А.А., Буров В.Г., Батаев В.А., Хлебников С.В. Особенности хрупкого разрушения сварных соединений разнородных сталей // Ползуновский вестник, 2005. № 2-2. С. 44 - 46.
8. Генкин И.З. Сварные рельсы и стрелочные переводы // Путь и путевое хозяйство. 2000. № 12. С. 14–20.
9. Mianhuan G., Ruchun W., Fu W., Wanhai Z., Weidong W. Welding of Railway Rail and High Manganese Steel Frog // Transactions of the china welding institution, 2002. V. 6. pp. 25 – 28.
10. Zhang F., Lv B., Hu B., Li Y. Flash butt welding of high manganese steel crossing and carbon steel rail // Materials Science and Engineering: A, 2007. V. 454 – 455. pp. 288 – 292.
11. Кучук-Яценко С.И., Швец Ю.В., Дидковский А.В. Технология и оборудование для контактной стыковой сварки железнодорожных крестовин с рельсовыми окончаниями через аустенитную вставку // Сварочное производство, 2007. № 7. С. 29 – 32.
12. Никулина А.А., Буров В.Г., Батаев А.А., Батаев В.А. Структурные особенности сварного соединения железнодорожных крестовин с рельсами // Обработка металлов, 2007. № 1 (34). С. 32 – 34.
13. Никулина А.А., Батаев А.А., Смирнов А.И. Структурные исследования сварных швов, полученных методом стыковой контактной сварки заготовок из разнородных сталей // Обработка металлов, 2010. №. 2(47) С. 23 – 28.

**APPLICATION OF CLADDING TECHNOLOGY TO IMPROVE THE RELIABILITY
OF RAILROAD SWITCHES WELDED STRUCTURE**

Okhremenko A, e – mail: anjutka-syromjatnikova@yandex.ru

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia

Abstract

This work is devoted to a comparison of welding and cladding technologies to improve the strength of welded railroad structures such as switches and the rails, consisting of heterogeneous high-carbon and chromium-nickel steels. The main problem arising in the welding process is associated with the formation of cracks due to the formation of martensitic type structures. The main role in the formation of an unfavorable structure is played by the diffusion of carbon from rail steel and chromium from chrome-nickel stainless steel into the weld zone. For the study, methods of light microscopy, microhardness measurements using the Vickers method were used. According to the results of structural studies, it can be concluded that surfacing, despite the availability of martensite, increases the reliability of structures, since the volume fraction of high-strength structures is lower than when using welding technology.

Keywords: heterogeneous steels, welding, cladding, microstructure.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОПОРОШКА Тi И TiO₂ НА
МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА АК12**

*БАШЕВ В. С.¹, аспирант,
МАРТЮШЕВ Н. В.¹, канд. техн. наук, доцент,
ЧУМАЕВСКИЙ А. В.², канд. техн. наук, м.н.с.,
ЗЫКОВА А. П.¹, к.ф.-м.н., инженер-исследователь,
(ТПУ, г. Томск, Россия)
(ИФПМ СО РАН, г. Томск, Россия)*

Башев В.С. – 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30,
¹Томский политехнический университет, г. Томск,
²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4,
е – mail: bashevvassilly@gmail.com

Аннотация

В современном машиностроении силумины занимают ведущие позиции, не смотря на серьезный прогресс в материаловедении в области новых сплавов и композитов, которые во многом превосходят силумины. Это связано с их относительно низкой стоимостью. Основные недостатки силуминов ограничиваются сравнительно низкими прочностными характеристиками. Модифицирование ультра и нанодисперстными порошками является одним из наиболее широко используемых методов повышения механических характеристик сплавов. Чаще всего при модифицировании силуминов используют оксиды металлов. В данной статье представлены результаты проведенных исследований по модификации силумина марки АК12 нанопорошком Ti и TiO₂, влияние данных нанодисперстных порошков на структуру и свойства.

Ключевые слова: Титан, оксид титана, нанодисперстный порошок, микроструктура, механические свойства, силумин АК12.

Введение

На сегодняшний день силумины занимают прочные позиции в автомобильной и авиационной промышленности, связано это с их относительно низкой стоимостью. Основными недостатками силуминов являются сравнительно низкие прочностные характеристики в частности довольно низкая пластичность. Низкая пластичность связана с присутствием в сплавах α -Al твердого раствора и скоплением эвтектических фаз. Для улучшения механических свойств силуминов регулируют режимы плавки, литья и условий кристаллизации. Но наиболее плодотворное влияние на структуру и механические характеристики оказывает модифицирование ультра и нанодисперстными порошками различного химического состава, то есть внедрение в расплав перед его заливкой небольших добавок модификаторов. На сегодняшний день основная часть работ посвящена влиянию добавок порошков оксидов и карбидов различных металлов на структуру и свойства силуминов [1 – 4]. Частицы этих порошков не растворяются в расплаве, из-за их высокой температуры плавления относительно температуры плавления силуминов, и служат центрами кристаллизации. Сходным образом будут работать и частицы тугоплавких элементов (Ti, W, Mo) и их оксидов.

Экспериментальные исследования

В ходе эксперимента изучалось влияние добавок порошка титана и оксида титана на микроструктуру и механические свойства силумина. Для исследования был выбран силумин марки АК12 (ГОСТ 1583 – 93), так как он наиболее широко используется в промышленности. В качестве модификатора применялся порошок титана (ТУ 1791 – 003 – 36280340 – 2008) смоченный в гексане. Порошок получен методом электрического взрыва проводника в атмосфере аргона и затем смочен гексаном, со среднеарифметическим размер частиц 80 – 110 нм и площадью удельной поверхности 13,8 м²/г. Перед добавлением титана в плавку производилась сушка порошка в муфельной печи при температуре 50 – 55° С для удаления из него гексана. В качестве второго модификатора использовался порошок оксида титана, предварительно обработанный в шаровой планетарной мельнице (Активатор 2SL) в смеси с медным порошком в соотношении 1/1. Благодаря этой обработке частицы будут лучше смачиваться расплавом силумина, равномерно распределяться по всему объему и не будут всплывать на поверхность расплава.

Плавка осуществлялась в муфельной печи при температуре 800 – 820°С, для ускорения плавки печь предварительно нагревалась до заданной температуры, затем в нее помещался стальной тигель с порцией шихты. Масса одной плавки составляла 450 гр. Масса модификатора и металла измерялась с помощью аналитических весов *Shinko HJR – 620CE* с точностью до 0.01 г. После расплавления силумина, тигель вынимался из печи и производилась очистка зеркала расплава от шлака далее производилось введение в расплав нанопорошка Ti, масса модификатора составляла: 0,01; 0,05; 0,1; 0,5 % (масс.). Расплав с нанопорошком Ti помещался обратно в печь и выдерживался 10 минут при температуре 800 – 820° С. Отливка полученного расплава производилась в чугунную литейную форму со скоростью 0,06 – 0,1 л/с. Соотношение массы отливки к массе формы – 1:10. Температура литейной формы перед отливкой 20 – 30° С. Скорость охлаждения в момент кристаллизации составляла примерно 80 – 90 ° С/с. Работа по модифицированию сплава АК12 оксидом титана в смеси с медным порошком проводилась аналогичным образом в тех же условиях.

Для проведения испытания на растяжение (σ_b) и относительное удлинение (δ) использовалась испытательная машина МИРИ – 100К с компьютерным управлением и расчетом механических характеристик. Прочностные характеристики определяли по ГОСТ 1497 – 84 на цилиндрических образцах с галтелями типа III с диаметром рабочей части 6 мм.

Испытание на ударную вязкость проводилось на маятниковых копрах марок МК – 30А и 2130КМ – 0.3 с максимальным запасом энергии маятника 300 J. Объектами исследований служили стандартные образцы Шарпи размерами 55×10×10 мм без надреза по ГОСТ 9454 – 78. Количество образцов составляло 3 образца для каждой серии испытаний.

Результаты

Проделанная работа показала, что внедрение частиц нанопорошка титана и оксида титана в расплав силумина марки АК12 значительным образом влияет на структуру и свойства. В таблице 1 приведены данные по влиянию порошка титана на механические свойства отливок из силумина АК12.

Добавление порошка титана неоднозначно влияет на свойства отливки. Так внедрение благотворно влияет на предел прочности. При добавлении малого количества (0,01 масс. %) наблюдается прирост в размере 28 % от исходного значения, а максимальный прирост наблюдается при добавлении нанопорошка в размере 0,1 масс. % и составляет 38 %. Так же наблюдается увеличение ударной вязкости и твердости силумина. Максимальное увеличение ударной вязкости наблюдается при введении в расплав 0,05 масс % и составляет 19,8 Дж/см² что на 47 % больше исходного значения, даль-

нейшее увеличение содержание оказывает не такое влияние. Пиковое значение твердости наблюдается при добавлении 0,1 масс. % и составляет 80,4 НВ, что на 60 % больше исходного значения.

Стоит отметить, что добавление нанопорошка титана отрицательно влияет на относительное удлинение, наблюдается уменьшение показателей с ростом содержания титана в отливке. Изменение механических свойств обуславливается изменением микроструктуры сплава. Отливки, полученные без модификатора имеют развитые дендриты с осями 3-го порядка. Добавление нанопорошка Ti уменьшает расстояние между осями 2-го порядка и уменьшению длины осей 1-го порядка так же оказывает влияние на количество и размеры пластин кремния.

Таблица 1

Механические свойства силумина марки АК12
модифицированного ультрадисперсным порошком титана

| | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|
| Содержание Ti, масс. % | 0 | 0,01 | 0,05 | 0,1 | 0,5 |
| Предел прочности, МПа | 135 | 173 | 176,9 | 187,5 | 183,7 |
| Относительное удлинение, % | 1,7 | 1,2 | 0,83 | 0,9 | 0,8 |
| Ударная вязкость Дж/см ² | 13,4 | 14,4 | 19,8 | 15,4 | 14,4 |
| Твердость НВ | 50 | 73,8 | 77,9 | 80,4 | 80,4 |

Добавка модификатора в количестве 0.01 % (масс.) не значительно изменяет микроструктуру сплава. Аналогично исходному сплаву характеризуется развитыми дендритами α -Al с осями 2-го порядка. Но при этом оси третьего порядка практически отсутствуют, а расстояние между осями 2-го порядка кристаллов уменьшается. В отливках также наблюдаются скопления эвтектики (α -Al+Si) и наличие грубодисперсных пластин кремния, по границам которых располагаются мелкие частицы Si. Введение в расплав 0.05 – 0.5 % (масс.) приводит к равномерному распределению эвтектики (α -Al+Si) по сечению отливки. Так же снижается расстояние между осями 2-го порядка. Происходит изменение морфологии эвтектического кремния: форма грубых пластин меняется на тонкую волокнистую форму. Подобные изменения в структуре и приводят к изменению механических свойств.

Результаты работы по внедрению оксида титана смоченного медью показали, что нанопорошок оксида титана схожим образом влияет на отливку что и нанопорошок титана. В таблице 2 приведены данные по влиянию порошка оксида титана смоченного медью на механические свойства отливок из силумина АК12.

Наблюдается увеличение предела прочности, максимальное значение наблюдается при введение в расплав 0,1 масс. % и составляет 170 МПа, что на 25 % больше исходного значения, дальнейшее увеличение содержание модификатора не приводит к повышению предела прочности. Максимальное увеличение ударной вязкости, так же как и с титаном, наблюдается при добавлении в расплав 0,05 масс. % и составляет 23 %, дальнейшее увеличение не приводит к улучшению показателей. Так же произошло увеличение твердости при добавлении 0,01 масс. %. Твердость после внедрения составила 84,9 НВ что на 69 % больше исходного значения. Дальнейшее увеличение процентного содержания нанопорошка оксида титана не привело к изменению твердости и составило те же 84,9 НВ. Что касается относительного удлинения, так же как и с модификацией титаном, описанным выше, оксид титана оказывает отрицательное влияние и приводит к снижению характеристики.

Изучая микроструктуру сплава после внедрения нанопорошка оксида титана можно сделать вывод, что он аналогичным образом оказывает влияние на структуру. Происходит уменьшение расстояния между осями 2-го порядка и уменьшение длины осей 1-го порядка. Изменяется количество и размер пластин кремния. Исчезают оси 3-го порядка. Наблюдается изменение морфологии эвтектического кремния, грубые формы сменяются на тонкую волокнистую

Таблица 2

Механические свойства силумина марки АК12
модифицированного ультрадисперсным порошком оксида титана

| | | | | | |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Содержание TiO ₂ , масс. % | 0 | 0,01 | 0,05 | 0,1 | 0,5 |
| Предел прочности, МПа | 135 | 151 | 155 | 170 | 170 |
| Относительное удлинение, % | 1,7 | 1,05 | 0,78 | 0,82 | 0,73 |
| Ударная вязкость Дж/см ² | 13,4 | 13,8 | 16,6 | 15,2 | 15 |
| Твердость НВ | 50 | 84,9 | 84,9 | 84,9 | 84,9 |

Выводы

Проведенная работа показала, что введение порошка в количестве от 0,05 – 0,5 % является оптимальным. В результате введения увеличивается количество центров кристаллизации вследствие чего, происходит измельчение структуры вследствие чего, наблюдается рост механических свойств. При дальнейшем увеличении концентрации модификаторов, они не только не увеличивают эффект, но и приводят к снижению механических свойств. Причиной этому служит эффект агломерирования частиц порошка. Частицы объединяются в большие агломераты, состоящие из множества частиц. В итоге количество дополнительных центров кристаллизации существенно снижается, что приводит к нивелированию эффекта от модифицирования.

Список литературы

1. Qinglin Li, Tiandong Xia, Yefeng Lan, Wenjun Zhao, Lu Fan, Pengfei Li. Effect of in situ γ -Al₂O₃ particles on the microstructure of hypereutectic Al-20%Si alloy / Journal of alloys and compounds. 577 (2013) 232 – 236
2. Iman S. El-Mahallawi, Ahmed Yehia Shash, Amer Eid Amer. Nanoreinforced cast Al-Si alloys with Al₂O₃, TiO₂ and ZrO₂ nanoparticles / Metals. 2015. № 5. 802 – 821. doi:10.3390/met5020802.
3. Molina C.M., Valdes A.F., Valdez R.M., Torres J.T., Rosales N.R., Estrada R.G. Modification of Al-Si alloys by metallothermic reduction using submerged SrO powders injection // Mater. Lett. 2009. Vol. 63. P. 815
4. А.Р. Зыкова, Л.А. Казантсева, И.А. Курзина. The effect of ultrafine powders on the structural formation processes and mechanical properties of Al-7%Si alloy / AIP Conference Proceedings. 2016. – V. 1772. P. 030020 – 1– 030020 – 7

THE INFLUENCE OF NANOPOWDER TI AND TiO₂ ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALLOY AK12

Bashev V.S.¹postgraduate, e – mail: bashevvassilly@gmail.com

Martyushev N.V.¹C.Sc. (Engineering), Associate professor, e – mail: martjushev@tpu.ru

Chumaevskii A.V.²C.Sc. (Engineering), Research assistant, e – mail: tch7av@gmail.com

Zykova A.P.¹C.Sc.(Physico-mathematical), Researchengineer, e – mail: zykovaap@mail.ru

¹Tomsk Polytechnic University, prospect Lenina, 30, Tomsk, 634034, Russian Federation

²Institute of Strength Physics and Materials Science Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, prospect Academic, 2/4, Tomsk, 634055, Russian Federation

Abstract

In modern machine building, low strength of silumin restricts their mass use. Modification with superdispersed powders, the most common choices being metal oxides, enhances the mechanical properties of alloys. This work studies the effect the nanodispersed powder of Ti and TiO₂ have on structure and mechanical properties of AK12 silumin. It shows that AK12 alloy modified with nanodispersed Ti and TiO₂ changes its microstructure, in particular, enhances its strength properties. 0.05 – 0.1 % (mass) of powder added to AK12 casts changes their structure by reducing the distance between the second order axes, disappearance of the third order axes, making the grains smaller. Such structural changes reflect on the properties. Ultimate strength, impact elasticity show 20 – 47 % increase, though addition of Ti and TiO₂ powder have effect on the hardness of the casts.

Keywords: Titanium, titanium oxide, nanopowder, microstructure, mechanical properties, silumin AK12

УДК 621.7.011:621.787:620.179.17

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ГЕТЕРОФАЗНОГО
ЖЕЛЕЗО – УГЛЕРОДИСТОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО ИСКРОВОМ
ПЛАЗМЕННЫМ СПЕКАНИЕМ**

*ГРАДУСОВ И. Н., студент,
РЯБИНКИНА П. А., студент,
СКОРОХОД К. А., студент
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Градусов И.Н. – 630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e – mail: dontknowalrddy@gmail.com

Аннотация

Представлены структурные исследования гетерофазного железо – углеродистого сплава, полученного искровым плазменным спеканием стружки углеродистой (У8) и аустенитной (12Х18Н10Т) сталей. Были получены образцы, спечённые при температурах 1000, 1100° С и одноосном давлении 60 МПа. Время выдержки для каждой температуры составляло 5, 10, 15, 20 и 25 минут. Микроструктура образцов была исследована методами световой и растровой электронной микроскопии. Также были проведены измерения микротвёрдости по Виккерсу. Полученный материал состоит из областей с аустенитной, перлитной и аустенито-мартенситной структурами. Толщина переходной аустенито – мартенситной области варьируется от 1 до 12 мкм. Уровень микротвёрдости областей взаимодействия разнородных микрообъёмов достигает 900 HV.

Ключевые слова: искровое плазменное спекание, разнородные стали, аустенитная сталь, углеродистая сталь, гетерофазный сплав, железо – углеродистый сплав, микроструктура, микротвёрдость.

Введение

Важным экономическим показателем любого современного производства является эффективность использования материалов. В процессе механической обработки изделий на машиностроительных предприятиях часто образуется стальная стружка, которая может быть использована для изготовления деталей по технологиям порошковой металлургии [1, 2].

Одной из современных технологий порошковой металлургии является искровое плазменное спекание. Технология заключается в быстром равномерном нагреве спекаемых частиц током и одноосном формовании за счет приложения одноосного давления [3, 4].

Среди прогрессивных конструкционных материалов выделяются гетерофазные железо – углеродистые сплавы, обеспечивающие высокую прочность и надёжность. На сегодняшний день интенсивно исследуются двухфазные и многофазные стали [5 – 8]. Свойства гетерофазных железо – углеродистых сплавов зависят от дисперсности, морфологии структуры, а также от структурных составляющих и их долей [5]. Как правило, сплавы содержат фазы феррита, мартенсита, аустенита и карбидов, а предел прочности на растяжение таких сталей достигает 1200 МПа при относительном удлинении $\delta = 12 - 34 \%$ [6]. Благодаря комплексу благоприятных механических свойств гетерофаз-

ный железо – углеродистый сплав зарекомендовали себя как перспективный конструкционный материал [5 – 8].

В данной работе спекались частицы сталей 12X18H10T и У8 с аустенитной и перлитной структурами, соответственно. В процессе спекания в зоне контакта разнородных частиц происходит перераспределение легирующих элементов. В результате области, обладающие различным химическим составом, должны приобрести различную структуру, что, в общем, будет представлять собой многофазный железо – углеродистый сплав.

Цель работы заключается в исследовании структуры гетерофазного железо – углеродистого сплава, полученного методом искрового плазменного спекания стружки сталей У8 и 12X18H10T.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Получить образцы железо – углеродистого сплава по технологии искрового плазменного спекания при температурах 1000 и 1100° С с временем выдержки 5, 10, 15, 20 и 25 минут.
2. Провести структурные исследования полученных образцов по методикам оптической микроскопии и просвечивающего электронной микроскопии.
3. Провести анализ микротвёрдости образованных в сплаве фаз используя метод Виккерса.

Материалы и методы исследования

Порошки стали У8 и стали 12X18H10T с перлитной и аустенитной структурой, соответственно, были получены методом истирания, после чего перемешивались в планетарной мельнице в течение 20 минут со скоростью вращения барабана 100 об/мин.

Спекание полученной смеси осуществлялось графитовой форме на установке искрового плазменного спекания SPS10 – 4 Advanced Technology. Режимы спекания представлены в табл.1. Структурные исследования проводились с использованием светового микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m и растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 50 XVP с энергодисперсионным спектрометром. ДюрOMETрические исследования были выполнены на микротвердомере Виккерса 402MVD.

Таблица 1

Режимы искрового плазменного спекания смеси стружки разнородных сталей

| Температура выдержки, °С | Время выдержки, мин | | | | | Давление, МПа | Средняя скорость нагрева, °С/мин |
|--------------------------|---------------------|----|----|----|----|---------------|----------------------------------|
| 1000 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 60 | 100 |
| 1100 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | | |

Результаты и обсуждения

Общий вид композиционного материала представлен на рис. 1а. Тёмные области соответствуют перлитной, либо феррито – перлитной структуре, светлые – аустенитной.

На рис. 1б представлена область взаимодействия разнородных микрообъемов, обладающая аустенито – мартенситной структурой. Такая структура обусловлена переходным химическим составом между легированной и углеродистой сталями, который формируется вследствие диффузии легирующих элементов, а также углерода в процессе спекания. На рис. 2 представлены результаты микрорентгеноспектрального анализа участка, на котором происходило взаимодействие разнородных микрообъемов. Также исследования на растровом электронном микроскопе показали, что в исходных аустенитных областях произошло образование карбидов.

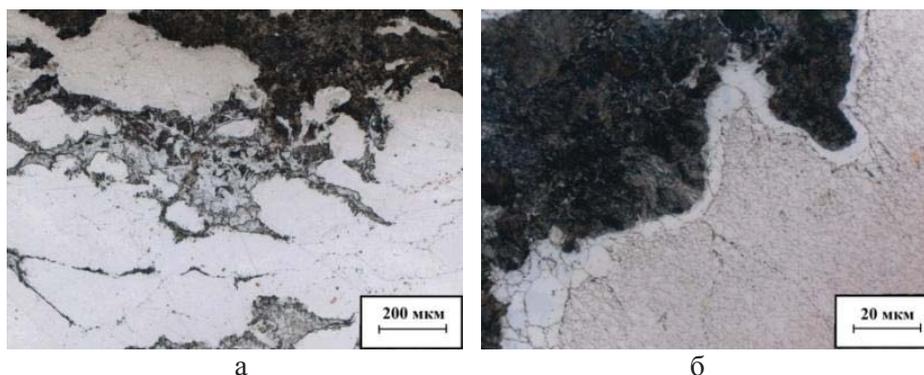


Рис. 1. Общий вид композиционного материала (а) и область взаимодействия разнородных микрообъемов (б)

Толщина переходных областей варьируется в зависимости от времени выдержки и температуры спекания [9]. Данные по средней толщине переходного слоя для некоторых образцов приведены в табл. 2. С повышением температуры спекания и времени выдержки образцов возрастает интенсивность и продолжительность диффузионных процессов, что приводит к увеличению толщины областей взаимодействия.

Таблица 2

Толщина переходных слоев в спеченных образцах в зависимости от температуры спекания и времени выдержки

| Температура\Время | 5 мин | 15 мин | 25 мин |
|-------------------|---------|---------|---------|
| 1000 °С | 0,8 мкм | 2,2 мкм | 5,3 мкм |
| 1100 °С | 4,6 мкм | 5,6 мкм | 8,8 мкм |

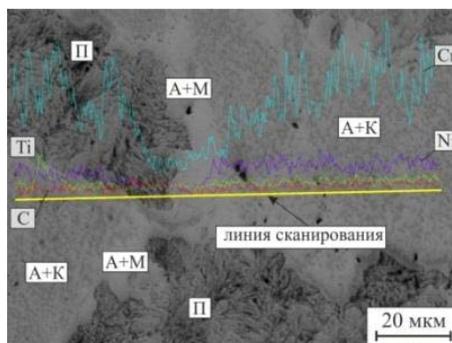


Рис. 2. Распределение химических элементов в зоне взаимодействия разнородных микрообъемов:
 П – перлит ; А – аустенит ; К – карбиды; М – мартенсит

Средние значения микротвёрдости аустенитной, перлитной и ферритной фаз, и переходной области в спечённых материалах представлены в табл. 3.

Результаты измерения микротвёрдости спечённых образцов

| Температура спекания, °С | 1000 | | | 1100 | | |
|--------------------------|------|-----|-----|------|-----|-----|
| Время выдержки, мин | 5 | 15 | 25 | 5 | 15 | 25 |
| Аустенит | 620 | 485 | 570 | 550 | 515 | 650 |
| Перлит | 295 | 360 | 305 | 360 | 340 | 405 |
| Феррит | 200 | 190 | 165 | 200 | 200 | 215 |
| Переход. обл. | 370 | 660 | 590 | 560 | 705 | 710 |

Из результатов видно, что области, образовавшиеся в результате взаимодействия разнородных микрообъемов, в образцах, спечённых при 1100° С, обладают большей твёрдостью, чем такие же области в образцах, спечённых при 1000° С. Это связано с большей скоростью диффузионных процессов.

В результате спекания между участками с аустенитной и перлитной (феррито-перлитной) структурами формируется слой, обладающий аустенито – мартенситной структурой. Комбинация таких фаз может быть оптимальной для гетерофазного материала, так как одновременное наличие достаточно пластичных и высокопрочных структур, расположенных в материале равномерно, затруднит распространение трещины. Дисперсность полученного материала зависит от дисперсности спекаемых частиц. Таким образом, повышение дисперсности спекаемых частиц, также может способствовать повышению механических свойств сплава.

Стоит отметить, что в процессе структурного исследования спечённых образцов не было обнаружено пор и трещин, что свидетельствует об оптимальности выбранных режимов спекания.

Выводы

Были проведены структурные исследования образцов, полученных в результате искрового плазменного спекания при 1000° С и 1100° С стружки сталей 12Х18Н10Т и У8. Отсутствие крупных дефектов свидетельствует об оптимальных параметрах спекания.

В полученном гетерофазном железе – углеродистом сплаве были обнаружены фазы аустенита, перлита, феррита, а также переходная область с аустенито – мартенситной структурой, образованная в результате взаимодействия разнородных микрообъемов.

Толщина переходного слоя зависит от продолжительности диффузионных процессов и температуры в процессе спекания и варьируется от 1 до 12 мкм. Микротвёрдость переходной зоны достигает 900 НВ. Максимальной микротвёрдостью области с аустенито – мартенситной структурой обладают образцы, спечённые при 1100° С с временем выдержки 25 минут.

Список литературы

1. Анциферов В.Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. М.: Металлургия, 1987. 791 с.
2. Райченко А.И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока. М. : Металлургия, 1987. 128 с.
3. Anselmi-Tamburini U., Gennari S., Garay J.E., Munir Z.A. Fundamental investigations on the spark plasma sintering // Materials science and Engineering. 2005. Vol. 394. P. 139 – 148.
4. Song Sh., Wang Zh., Guo-Pu Sh. Heating mechanism of spark plasma sintering // Ceramics International. 2013. Vol. 39. P. 1393 – 1396.

5. *Radwański K.* Structural characterization of low-carbon multiphase steels merging advanced research methods with light optical microscopy // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2016. Vol. 16. P. 282 – 293.
6. Xiong Z.P., Kostryzhev N.E., Stanford E.V. Pereloma Microstructures and mechanical properties of dual phase steel produced by laboratory simulated strip casting // Materials and Design. 2015. Vol. 88. P. 537 – 549.
7. Kuziak R., Kawalla R., Waengler S. Advanced high strength steels for automotive industry: a review // Arch. Civ. Mech. 2008. Vol. 89. P. 103 – 117.
8. Li C.Sh., Li Z.X., Cen Y.M., Ma B., Huo G. Microstructure and mechanical properties of dual phase strip steel in the overaging process of continuous annealing // Materials Science & Engineering: A. 2015. Vol. 627. P. 281 – 289.
9. Никулина А.А. Формирование неоднородной структуры железоуглеродистых сплавов спеканием частиц разнородных сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты), 2016. № 3 (72). с. 52 – 61.

**STRUCTURAL INVESTIGATION OF HETEROPHASED IRON – CARBON
ALLOY OBTAINED BY SPARK PLASMA SINTERING**

Gradusov I.N., e – mail: dontknowalrdy@gmail.com
Ryabinkina P.A., e – mail: ryabinkinapolina@gmail.com
Skorokhod K.A., e – mail: k.skorokhod@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The heterophase iron-carbon alloy was obtained by spark plasma sintering of carbon (1080) and chrome-nickel (321) steels powders. Samples were sintered with two different temperatures: 1000 and 1100° C with value of uniaxial pressure was applied 60 MPa. Holding times were 5, 10, 15, 20, 25 min for both temperatures. The microstructure of obtained samples was investigated using optical microscope and transmission electron microscope. Also micro-hardness survey was conducted employing Vickers' microhardness testing machine. Obtained alloy consist of austenite, pearlite phases and transition area with mixture of austenite and martensite structures. Thickness of transition layer varies from 0,001 to 0,012 mm with sintering mode options. Value of transition area microhardness has reached 900 HV.

Keywords: Spark plasma sintering, dissimilar steels, chrome-nickel steel, carbon steel, structure, microhardness.

УДК 629.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗНОСА МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО ФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА УЗЛА ТРЕНИЯ ПОГЛОЩАЮЩЕГО АППАРАТА

*МАРКОВ А. М.¹, доктор техн. наук, профессор,
ГАБЕЦ А. В.², канд. техн. наук, директор по развитию,
ИВАНОВ А. В.¹, аспирант,
ГАБЕЦ Д. А.¹, аспирант
(¹АлтГТУ, г. Барнаул, ²ООО «АСЛЗ», г. Барнаул)*

Иванов А. В. - 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
е – mail: d.lenya.ne@yandex.ru

Аннотация

Фрикционная пластина – это один из элементов, который обеспечивает работу поглощающего аппарата железнодорожного вагона. Фрикционная пластина состоит из металлокерамического брикета и металлической подложки. Основным критерием качества и работоспособности фрикционной пластины является ее способность сопротивляться износу. Сложность прогнозирования износа металлорекамитического материала заключается в том, что в его состав входят компоненты, обладающие различными свойствами. Для изучения процесса износа металлорекамитики был поставлен эксперимент, который показал, что основной износ поверхности фрикционного композиционного металлокерамического материала происходит за счет поверхностного выкрашивания компонентов.

Ключевые слова: поглощающий аппарат, фрикционная пластина, металлокерамика, износ поверхности.

Введение

Поглощающий аппарат ПМКП – 110 класса Т1 – высокоэффективный амортизатор удара, предназначенный для защиты грузовых вагонов широкого назначения от продольных нагрузок. Главным рабочим органом в поглощающем аппарате является фрикционная пластина, состоящая из брикета, представляющего композицию из спеченных порошковых материалов, и металлической подложки (рис. 2). За счет происходящего процесса трения между брикетом и нажимным клином или подвижной пластиной (рис. 1), происходит поглощение энергии удара и ее переход в тепловую энергию. В процессе данного взаимодействия происходит поглощение до 80 % от общего количества введенной энергии [1, 2].

Состав композиции из спеченных материалов, их процентное соотношение и технология изготовления металлокерамического брикета являются определяющими факторами, влияющими на процесс трения и износа между контактирующими поверхностями.

Шихтовка материала К – 30, содержит компоненты в следующем процентном соотношении, представленном в таблице [3, 4].

Указанные компоненты выполняют следующие функции:

– железо является основным связующим компонентом и обеспечивает общую прочность фрикционного сплава;

- олово, благодаря низкой температуре плавления, образует в процессе ударного трения фрикционный рабочий слой, обеспечивающий положительный градиент механических свойств по глубине и предохраняющий поверхности трения от интенсивного изнашивания;
- дисульфид молибдена служит в процессе трения твердой смазкой, препятствующей молекулярному схватыванию поверхностей, и способствует повышению общей прочности сплава;
- диоксид кремния (используется в виде формовочного кварцевого песка) увеличивает коэффициент трения;
- графит имеет сложную структуру и в процессе ударного трения служит твердой смазкой, препятствуя молекулярному схватыванию трущихся поверхностей;
- свинец в составе порошкового фрикционного сплава увеличивает общую прочность сплава и повышает его износостойкость [5].

Из технологических особенностей следует отметить значительное удельное давление прессования брикетов – 650 МПа, и необходимость спекания композиции под давлением 1,5 МПа при температуре 1030 – 1050° С. Спекание необходимо проводить в среде обезвоженного водорода или эндогаза.

Таблица

| Материал К-30 | Состав шихты, % | | | | | |
|------------------|-----------------|---------|--------|---------------------|-----------------|------------------|
| | Графит | Олово | Свинец | Дисульфид молибдена | Диоксид кремния | Железный порошок |
| | 3,5-4,5 | 4,5-6,5 | 4-6 | 1,5-3 | 1,5-2,5 | остальное |



Рис. 1. Фрикционный узел:
1 – подвижная пластина; 2 – нажимной клин;
3 – неподвижная пластина

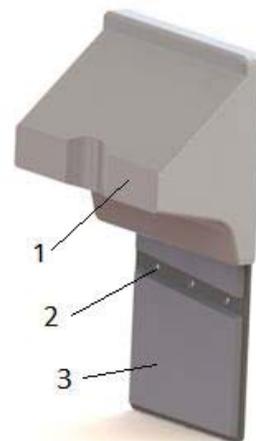


Рис. 2. Пара трения клин нажимной – фрикционная пластина (3D- модель): 1 – клин нажимной; 2 – металлическая подложка; 3 – металлокерамический брикет

Методика экспериментального исследования

Главным критерием качества и работоспособности фрикционной пластины является ее способность сопротивляться износу. Существуют различные виды износа при трении: адгезионный,

абразивный, коррозионный, поверхностная усталость. Сложность определения характера износа фрикционного композиционного материал заключается в том, что в его состав входят компоненты, обладающие различными свойствами. Проявляющийся характер поведения компонента в "чистом" виде может отличаться от проявленных свойств в композиции. Поэтому спрогнозировать свойства и характер работы композиционного материала в различных условиях зачастую бывает сложно. Исходя из этого, требуется проведение ряда экспериментов для выявления характеристик материала в конкретных условиях. Исследования, связанные с изучением процесса трения весьма сложны, так как данный процесс протекает в зоне недоступной для наблюдения [6].

Для выявления характера износа фрикционного композиционного материала применяемого в узле трения был поставлен эксперимент, заключающийся в том, что в тело брикета фрикционного композиционного материала внедрялся вращающийся инструмент, представляющий собой форму цилиндра с гладкой поверхностью и не имеющий каких-либо режущих кромок. Инструмент изготавливается из твердосплавного материала ВК8. Эксперимент проходил на вертикально - фрезерном станке 6М12П (рис. 3). Под действием вертикальной подачи прикладывалась осевая сила имитирующая силу прижатия нажимного клина к пластине. Вращательное движение инструмента имитировало трение скольжения.

Путем изменения скорости вращения шпинделя, достигалась различная температура в зоне контакта.



Рис. 3. Экспериментальная установка



Рис. 4. Выработка компонентов

По результатам изучения цветов побежалости компонентов железа (рис. 5), входящего в состав композиционного материала, можно сделать вывод о том, что в первом случае была достигнута температура в зоне контакта 250 – 260° С, во втором 260 – 285° С, в третьем 320 – 430° С (рис. 6). Образувавшаяся в процессе трения выработка компонентов (рис. 4) представляет собой состав частиц близких по размерам к исходным размерам компонентов.

| | | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 205-220 °С сред 213 °С | 220-245 °С сред 233 °С | 245-255 °С сред 250 °С | 255-270 °С сред 263 °С | 280-290 °С сред 285 °С | 290-300 °С сред 295 °С | 300-315 °С сред 308 °С | 315-330 °С сред 323 °С | 330-530 °С сред 430 °С |
| светло-жёлтый | соломенно-жёлтый | коричневый | пурпурно-фиолетовый | глубокий фиолетовый | тёмно-синий | васильковый | светло-васильковый | светло-серый |
| #D1C8A1 | #AD8D4F | #391414 | #4A192C | #4A3482 | #00008B | #2D5395 | #577E9D | #82898F |

Рис. 5. Цвета побежалости железа



Рис. 6. Цвета побежалости железа входящего в состав композиционного материала

Результаты и обсуждения

Проведенные эксперименты свидетельствуют о том, что износ брикета происходит путем выкрашивания поверхности. Это объясняется тем, что брикет получен путем спекания композиции материалов, при этом матрица, состоящая из железа, не является литой связкой. Включения порошков других элементов способствует ослаблению прочности матрицы.

Цвета побежалости железа свидетельствуют о температуре в зоне контакта равной температуре плавления легкоплавких материалов олова и свинца. При достижении данной температуры происходит размягчение данных компонентов, что приводит к эффекту смазывания в зоне контакта. Однако при этом происходит ослабление связей между молекулами в материале, что и способствует выкрашиванию компонентов.

Также в составе материала присутствуют твердые частицы керамики, разрушение которых происходит путем хрупкого излома. Попадая в зону контакта, они начинают работать как абразив, способствуя еще большему износу. Твердые смазывающие компоненты в виде графита и молибдена, разрушаются путем послынного выкрашивания. При этом происходит смазка поверхности трения и стабилизация процесса, однако, это приводит к снижению величины коэффициента трения, как следствие уменьшению энергоемкости материала.

В процессе трения немалую роль играет адгезия, которая способствует вырыванию частиц железа из общего состава, ослабляя общую прочность матрицы, тем самым приводя к разрушению и интенсивному износу композиции.

Процесс износа многообразен и осуществляется под влиянием различных факторов, но основной износ поверхности фрикционного композиционного металлокерамического материала применяемого в узле трения происходит за счет выкрашивания компонентов. Данный процесс разрушения приводит к относительно быстрому износу тела брикета, так как компоненты не вырабатывают свой потенциал.

Выводы

Процесс получения, спечённого фрикционного композиционного металлокерамического материала сложен по своим технологическим особенностям: с одной стороны, необходимо достичь температуры и условий достаточных для получения прочной связки между компонентами, с другой стороны недостаточной для фазовых изменений компонентов, входящих в состав материала.

Поэтому необходимо более тщательно подходить к выбору компонентов и их процентному соотношению в материале, рассматривая характеристики нового материала не только с точки зрения механических свойств, но и с точки зрения дальнейшего физического взаимодействия между компонентами, учитывая также условия контакта сопрягаемых поверхностей.

Для обеспечения более высокой износостойкости поверхности трения с сохранением высоких показателей энергоемкости, необходимо создание в зоне контакта рабочего слоя, который обеспечивал бы эффект "безызносности" и самовосстановления поверхности.

Список литературы

1. ГОСТ 22253 – 76. Аппараты поглощающие пружинно - фрикционные для подвижного состава железнодорожных дорог колеи 1520 мм. Технические условия [Текст]. – Введ. 78 – 01 – 01. – Москва, 1978 10 с.
2. Вагоны: Учебник для вузов ж.д. трансп / Шадур Л.А., Челногов И.И., Никольский Л.Н., Никольский Е.Н., Котуранов В.Н., Проскурнев П.Г., Казанский Г.А., Спиваковский А.Л., Девятков В.Ф. , Под ред. ШадураЛ.А. Транспорт, 1980.
3. Пат. 2034086 РФ, МПК 6 С22 С33/02. Порошковый фрикционный сплав на основе железа / Кеглин Б.Г., Мигунов В.П., Добрострой Н.И., Прилепо Т.Н., Ионов В.В., Болдырев А.П. - Оpubл. 30.04.95, Бюл. № 12
4. Пат. 2356983 РФ, МПК 6 С22С 33/02. Порошковый фрикционный сплав на основе железа /Кеглин Б.Г., Болдырев А.П., Прилепо Т.Н., Мигунов В.П., Гуров А.М. - Оpubл. 27.05.09, Бюл. № 15
5. Кеглин Б.Г., Болдырев А.П., Ионов В.В. Совершенствование металлокерамического сплава для амортизаторов удара железнодорожного подвижного состава// Вестник Брянского государственного технического университета.-2012.-№2 (34). – С. 26 – 32.
6. Марков А.М., Габец А.В., Габец Д.А., Иванов А.В. Перспективные материалы высоконагруженных деталей железнодорожного транспорта на основе металлокерамики/ XIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь".// Алт. гос. техн. ун-т им. И.И.Ползунова. – Барнаул: изд-во АлтГТУ, 2016. – 35 с.

**RESEARCHING OF THE WEAR FRICTION CERMENT MATERIAL OF
THE DRAFT GEAR**

Markov A. M.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: andmarkov@inbox.ru

Gabets A.V.², Ph.D. (Engineering), Development director

Ivanov A. V.¹, Post-graduate student, e – mail: d.lenya.ne@yandex.ru

Gabets D. A.¹, Post-graduate student, e – mail: gabets22@mail.ru

¹Barnaul, Lenina 46, Polzunov Altai State Technical University, 656038, Russian Federation

²Barnaul, Kalinina 116/52, Ltd «Altai steel casting factory» (ASCF), 656037, Russian Federation

Abstract

Draft gear is the main device which ensures the operation of railway carriage. Reliable performance of the draft gear determines the amount of carriage mileage between overhauls. A friction unit is part of the draft gear. A friction unit is subjected to high loads during operation. Principal loads are blows and large friction forces. Considerable loads result in loss of work and damage to draft gear. Breakdowns result in downtime of carriages and additional costs.

Thus improving the reliability of the draft gear's friction unit is crucial for the effective work of railway transport.

The article investigated the main causes of breakdowns draft gear. Researched the wear of the friction unit's cermet plates. There are photos of the cermet plates of different degrees of wear: new, partly worn out, fully depreciated. Measured values of wear. Analysis of the design of the draft gear revealed that the design isn't perfect and can be improved. Recommendations to redistribute load between the parts of the draft gear. This will increase the reliability of the railway carriage.

Keywords: draft gear, friction unit, cermet, wear.

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРЕССОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДА НИКЕЛЯ, ПОЛУЧЕННОГО СПЕКАНИЕМ ПОРОШКА ВКНА МЕТОДОМ SPS

*НЕМОЛОЧНОВ Д. А., студент,
ШЕВЦОВА Л. И., канд. техн. наук
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Немолочнов Д.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e – mail: drakon13chik@mail.ru

Аннотация

Работа посвящена изучению структуры и свойств сплавов на основе алюминидов никеля типа ВКНА, полученных с использованием технологии искрового плазменного спекания. Были оценены механические свойства образцов, а именно дюрометрические характеристики и предел прочности при трехточечном изгибе. По результатам структурных исследований и оценки прочностных свойств установлено, что параметры спекания играют важную роль в формировании структуры и свойств материалов на основе алюминидов никеля, полученных по SPS-технологии. Увеличение давления прессования от 30 до 60 МПа обеспечивает получение материалов с относительной плотностью до 82 %. Максимальное значение предела прочности при изгибе достигает 490 МПа.

Ключевые слова: интерметаллид, искровое плазменное спекание, механические свойства, алюминид никеля.

Введение

В настоящее время актуальной темой в современном материаловедении можно назвать повышение комплексных свойств алюминидов никеля. Особое внимание уделяется им благодаря их свойствам: высокому комплексу механических свойств, высокой коррозионной стойкости и сопротивлению крипу при температуре выше 1000° С в окисляющей атмосфере. Интерес к интерметаллиду Ni₃Al возник благодаря γ' - фазе, которая в свою очередь является упрочняющей фазой в никелевых суперсплавах [1, 2].

В силу особенностей связи атомов в кристаллической решетке и их упорядоченного распределения интерметаллическое соединение Ni₃Al обладает высокой температурой плавления (1385° С), относительно низкой плотностью (7530 кг/м³) по сравнению с никелевыми суперсплавами, и термической стабильностью структуры до температуры плавления. Но при всех его положительных свойствах у него имеются и недостатки: низкий уровень пластичности и трещиностойкости в области пониженных температур [1, 3].

Одним из эффективных методов получения бездефектных заготовок из интерметаллидов является искровое плазменное спекание (SPS). Данный метод основан на пропускании через образец импульсов постоянного тока в течение всего периода спекания и приложении одноосного давления. При протекании тока в точках контакта частиц возникают электрические разряды, приводящие к локальному повышению температуры. Благодаря спеканию с использованием SPS-технологии удается сохранить мелкозернистую структуру, в результате значительно повышается микротвердость и предел прочности готового материала [4 – 11].

Всероссийским институтом авиационных материалов (ВИАМ) были разработаны сплавы на основе интерметаллида Ni_3Al типа ВКНА, в состав которых входят такие элементы, как Al, W, Mo, Co, Ti, Cr, C. Сплавы типа ВКНА обладают относительно низкой плотностью ($7,9 \text{ г/см}^3$) по сравнению с жаропрочными никелевыми сплавами, повышенной жаростойкостью и износостойкостью при температуре $1150 - 1200^\circ \text{C}$ [12 – 15].

Благодаря низкому весу готовой конструкции и повышенной надежности сплавы на основе Ni_3Al (ВКНА) используются в авиационном двигателестроении для увеличения тяги двигателя, его КПД, создания и внедрения высокотемпературных сплавов в ГТД: элементов реактивного сопла, форсажной камеры, сопловых лопаток и другие [3].

Материалы и методы исследования

В качестве исходного материала был использован порошок алюминид никеля марки ПН75Ю23В (сплав ВКНА). Микрофотографии исходного порошка представлены на рис. 1. Форма частиц близка к сферической, средний размер частиц составляет 20 мкм. Химический состав представлен в табл. 1.

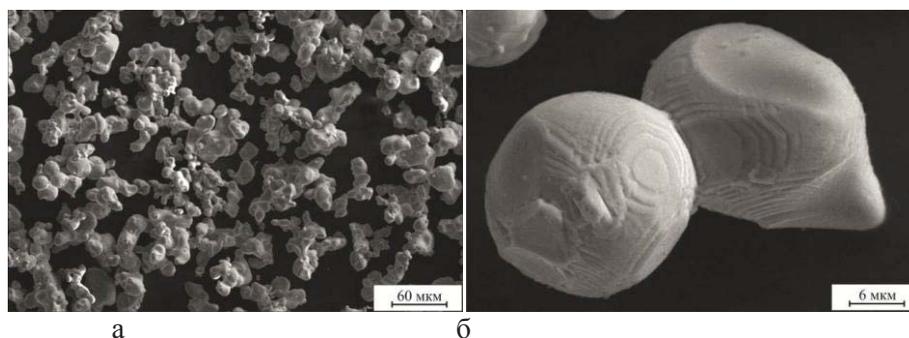


Рис. 1. Микрофотографии исходного порошка марки ПН75Ю23В (растровая электронная микроскопия): а – частицы порошка при меньшем увеличении; б – частицы порошка при большем увеличении

Таблица 1

Химический состав сплав типа ВКНА на основе интерметаллида Ni_3Al

| Обозначение марки порошка | Массовая доля элементов, % по массе | | | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------------------------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| | Ni | Al | Cr | Co | W | Ti | Mo | Ca | Fe | C |
| ПН75Ю23В | осн. | 22,7 | 2,93 | 0,8 | 1,16 | 0,32 | 0,79 | 0,08 | 0,15 | 0,07 |

Искровое плазменное спекание порошка производилось на установке SPS10 – 4 (Япония). Исходный порошок засыпали в токопроводящую пресс-форму с внутренним диаметром 40 мм, затем её помещали в вакуумную камеру установки. Для легкого извлечения из образца пресс-формы, в качестве прослойки использовали графитовую бумагу толщиной 0,2 мм. Процесс спекания образцов контролировался в режиме реального времени.

Максимальная температура нагрева порошка и время выдержки были постоянными и составили 1100°C и 5 минут. Давление прессования варьировалось в промежутке 30 – 60 МПа. Скорость нагрева составила 100°C/мин (табл. 2). Были получены образцы диаметром 30 – 40 мм и высотой 5 – 6 мм. Плотность материала рассчитывалась гидравлическим взвешиванием (табл. 2).

Для определения фазового состава спеченных образцов использовали рентгеновский дифрактометр ARL X' TRA. Дифракционные картины регистрировали с шагом $\Delta 2\theta$ и временем накопления 1 с на одну точку. Полученные дифракционные картины сравнили с эталонными дифракционными спектрами при помощи программы Search Match.

Для проведения металлографических исследований образцы были предварительно подготовлены по стандартной технологии. Заготовки вырезались на электроискровом станке SodickAG400L. Операции шлифования исследуемой поверхности выполнялись с использованием абразивной бумаги и дальнейшего полирования. Для проведения металлографических исследований был использован оптический микроскоп Axio Observer Alm в диапазоне $\times 25 \dots \times 1500$. Съемка изображений осуществлялась камерой AxioCamMRc5.

Таблица 2

Режимы спекания порошка марки ПН75Ю23В

| № режима | Марка порошка | Температура нагрева, °С | Давление, МПа | Время выдержки, мин | Скорость нагрева, °С/мин | Сила тока, кА |
|----------|---------------|-------------------------|---------------|---------------------|--------------------------|---------------|
| 1 | ПН75Ю23В | 1100 | 30 | 5 | 100 | 2 |
| 2 | | | 40 | | | |
| 3 | | | 50 | | | |
| 4 | | | 60 | | | |

ДюрOMETрические испытания образцов проводили по методу Виккерса на полуавтоматическом микротвердомере Wolpert Group 402MVD с алмазной пирамидой (136° при вершине) в качестве индентора. На один образец наносилось не менее 15 отпечатков для определения среднего значения микротвердости.

Испытания на трёхточечный изгиб проводили на установке Instron 3369. Для проведения испытания использовали образцы размерами $3 \times 4 \times 30$, которые были вырезаны на установке электроэрозионной резки SodickAG400L при скорости перемещения траверсы $0,5$ мм/мин.

Для проведения фрактографических исследований образцов при испытании на трёхточечный изгиб использовали растровый электронный микроскоп Carl Zeiss EVO50 в диапазоне увеличения $\times 50 \dots \times 30000$.

Результаты исследований

При проведении рентгенофазового анализа было установлено, что у материалов, полученных SPS-технологией, фазовый состав абсолютно идентичен. Основной фазой в исследуемых образцах является NiAl, в то же время в материале присутствуют пики W.

По снимкам оптической микроскопии в режиме светлого поля можно судить о том, что структура материалов на основе алюминиды никеля, полученных по технологии искрового плазменного спекания, однородна как в продольном, так и в поперечном сечении (рис.2). Максимальная пористость $24,7\%$ у материала, полученного SPS-спеканием порошка при 30 МПа. Зависимости плотности и пористости от давления прессования отражены в табл. 3.

Таблица 3

Плотность и пористость образцов, полученных при разных давлениях прессования

| Тип порошка | Давление прессования, МПа | Плотность, г/см ³ | Относительная плотность, % | Пористость, % |
|-------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------|
| ПН75Ю23В | 30 | 4,96 | 66 | 24,7 |
| | 40 | 5,71 | 76 | 18,6 |
| | 50 | 6,16 | 81 | 11,1 |
| | 60 | 6,21 | 82 | 11,7 |

Изображение структуры материала, полученного SPS - спеканием порошка ПН75Ю23В при 30 МПа, представлено на рис. 3 (а). Видно, что частицы контактируют друг с другом не по всей поверхности.

Анализ структуры материала при 40 МПа свидетельствует о том, что большинство частиц порошка первоначальную форму существенно не изменили (рис. 3, б). Но можно заметить, что контакт между частицами порошка увеличился. Это привело к повышению плотности синтезированного материала до 6,16 г/см³, что составляет 81 % от теоретической плотности сплава типа ВКНА (7,55 г/см³).

Благодаря изменению формы частиц порошка и достаточно сильному контакту между ними при последующем повышении давления прессования до 60 МПа увеличилась плотность материала до 6,21 г/см³ (рис. 3, г).

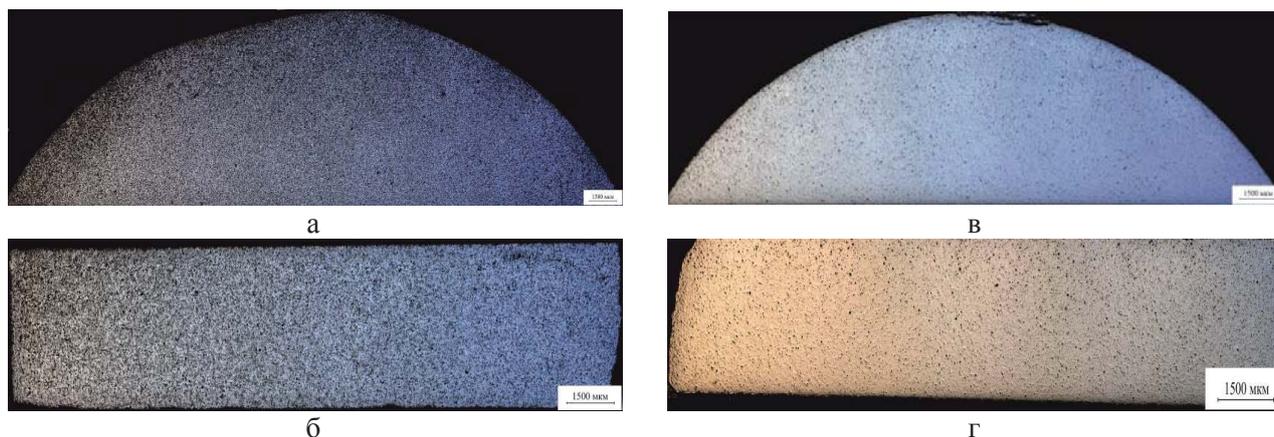


Рис.2. Панорамные снимки структуры образцов, полученных SPS – спеканием при 30 МПа (а – продольное сечение; б – поперечное сечение) и при 60 МПа (в – продольное сечение; г – поперечное сечение)

Результаты дюрOMETрических испытаний образцов, полученных SPS – спеканием при различных давлениях прессования, отражены в табл. 4. Результаты показывают, что экспериментальные данные исследуемых образцов существенно не отличаются друг от друга и составляют 3650 – 4000 МПа.

Таблица 4

Микротвердость материалов, полученных при различных давлениях и скоростях нагрева

| Номер режима | Давление прессования, МПа | Скорость нагрева, °С/мин | Микротвердость, МПа |
|--------------|---------------------------|--------------------------|---------------------|
| 1 | 30 | 100 | 3770 ± 260 |
| 2 | 40 | | 3750 ± 150 |
| 3 | 50 | | 3650 ± 170 |
| 4 | 60 | | 4000 ± 130 |

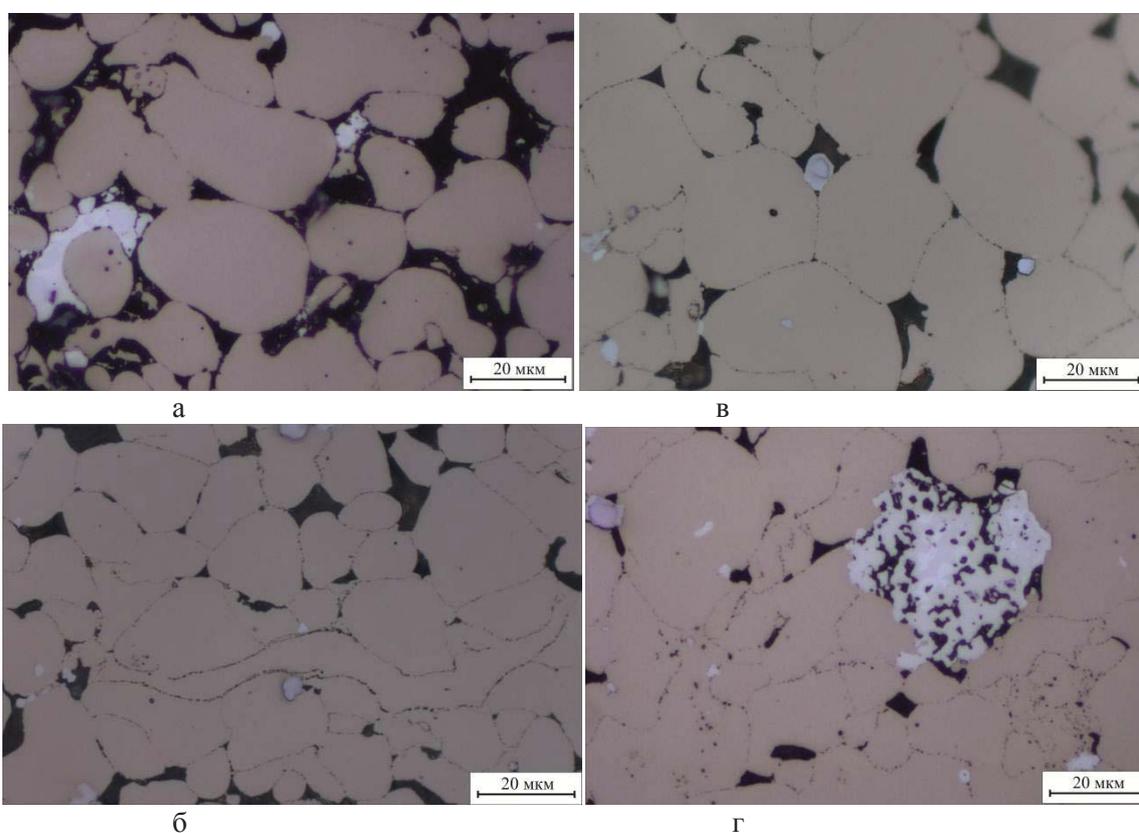


Рис.3. Структура материала на основе алюминид никеля, зафиксированная на оптическом микроскопе при давлении прессования 30 МПа (а), 40 МПа (б) и 60 МПа (г)

Результаты на трехточечный изгиб показали, что наименьшей прочностью при изгибе (220 МПа) обладает материал, полученный SPS – спеканием порошка ПН75Ю23В при 30 МПа. Низкие значения прочности объясняются слабым взаимодействием между частицами порошка. При повышении давления прессования до 60 МПа увеличивается плотность спеченного материала

(6,21 г/см³), что благоприятно сказывается на прочностных свойствах. Предел прочности при изгибе образцов, полученных при 60 МПа, увеличился более чем в два раза и составил 490 МПа (рис. 4).

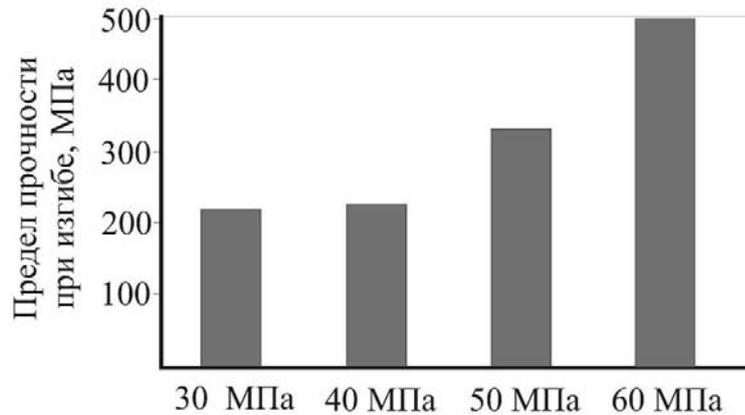


Рис. 4. Предел прочности материалов при изгибе, полученных при различных давлениях прессования

Снимки изломов свидетельствуют о том, что при давлении прессования 30 МПа в материале наблюдается интеркристаллитное разрушение. При увеличении давления трещины преимущественно развиваются через тело частиц, что характерно для транскристаллитного разрушения (рис. 5). Такой механизм разрушения характеризуется более значительными затратами энергии. Следует подчеркнуть, что разрушения образцов двух типов является хрупким.

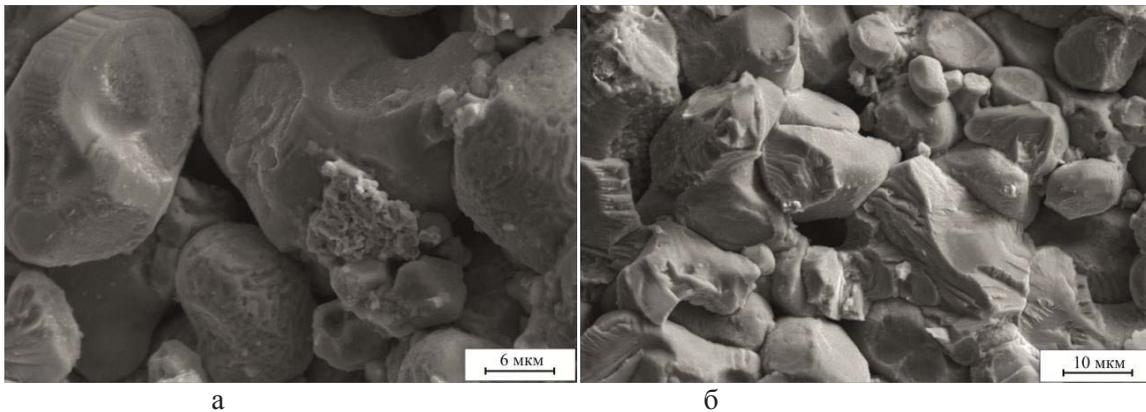


Рис.5. Изломы образцов из материалов, полученных спеканием методом SPS при различных давлениях порошка ВКНА, после испытаний на рехточечный изгиб: а – 30 МПа; б – 60 МПа

Выводы

Технология SPS позволяет получать малодефектные заготовки из порошкового сплава на основе алюминиды никеля. Однако, важную роль в получении плотных объемных материалов из сплава ВКНА играют параметры спекания. К одним из основных параметров спекания, влияющих на структуру и свойства готового материала, относится давление прессования. Анализ материала свидетельствует о том, что структура однородна. Микротвердость в зависимости от режимов, находится в диапазоне 3600 – 4000 МПа. Увеличение давления прессования обеспечивает получение материала с относительной плотностью 82 %. Максимальное значение предела прочности при изгибе 490 МПа при 60 МПа.

На основании полученных данных можно сказать, что для формирования плотных объемных материалов на основе алюминиды никеля рекомендуется использовать следующий режим спекания порошка ПН75Ю23В (ВКНА): температура спекания 1100° С, средняя скорость нагрева 100° С/мин, давление прессования и время выдержки 60 МПа и 5 минут соответственно.

Список литературы

1. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Базылева О. А. Материалы для высокотемпературных деталей газотурбинных двигателей // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. «Машиностроение». Металлургия. 2011. № SP2. С 13 – 19.
2. Шевцова Л. И., Самейшева Т. С., Мункуева Д. Д. Структура и механические свойства интерметаллида Ni_3Al , полученного по технологии искрового плазменного спекания механически активированной порошковой смеси «Ni–Al» // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 3. С 13 – 19.
3. Мильман Ю. В., Чугунова С. И., Гончарук В. А., Ефимов Н. А., Куприн В. В., Гончарова И. В., Голубенко А. А., Мордовец Н. М. Структура и механические свойства быстрозакаленного интерметаллида Ni_3Al // Электронная микроскопия и прочность материалов: Сб. научн. тр. – К.: ИПМ НАН Украины, 2013. № 19. С 78 – 85.
4. Saheb N., Iqbal Z., Khalil A., S. Hakeem A. S., N. Al Aqeeli, Laoui T., Al-Qutub A., Kirchner R. Spark Plasma Sintering of Metals and Metal Matrix // Nanocomposites: A Review, Journal of Nanomaterials. 2012. pp. 1 – 13.
5. Kim J. S., Suk Choi H., Dudina D., Lee J. K., Soon Y. Kwon Spark Plasma Sintering of Nanoscale (Ni+Al) Powder Mixture // Solid State Phenomena. 2007. pp. 35 – 38.
6. Meng J., Jia C., He Q. Fabrication of oxide-reinforced Ni_3Al composites by mechanical alloying and spark plasma sintering // Mater. Sci. Eng. A. 2006. pp. 246 – 249.
7. Liu D., Xiong Y., Li Y. Spark Plasma Sintering of Nanostructured Aluminum: Influence of Tooling Material on Microstructure // Metallurgical and Materials Transactions A. 2012. pp. 1908 – 1916.
8. Корниенко Е. Е., Шевцова Л. И., Белоусова Н. С., Никулина А. А., Смирнов А. И., Кузьмин В. И., Рубцова О. А. Структура и свойства материалов из алюминидов никеля, полученных с использованием различных технологий // Перспективные материалы. 2017. № 3. С. 49–58.
9. Dudina D. V., Mali V. I., Anisimov A. G. Ti_3SiC_2 -Cu Composites by Mechanical Milling and Spark Plasma Sintering: Possible Microstructure Formation Scenarios // Metals and Materials International. 2013. Vol. 19, №4. pp. 1235 – 1241.
10. Shevtsova L., Ogneva T., Mul D., Esikov M., Larichkin A., Malikov V. Boron-modified Ni_3Al intermetallic compound formed by spark plasma sintering of mechanically activated Ni and Al powders // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 124, № 1.
11. Tokita M. Trends in Advanced SPS (Spark Plasma Sintering) Systems and Technology // Journal of the Society of Power Technology. 1993. Vol. 30. №11. pp. 790 – 804.

12. Shevtsova L., Ivashutenko A., Martyushev N., Kuzmin R. Fabrication of the Ni₃Al-based alloy formed by spark plasma sintering of VKNA powders // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 124, № 1. pp. 1 – 6.
13. Герасимов В. В., Петрушин Н. В., Висик Е. М. Усовершенствование состава и разработка технологии литья монокристаллических лопаток из жаропрочного интерметаллидного сплава // Труды ВИ-АМ. 2015. №3. С. 1 – 20.
14. Базылева О. А., Поварова К. Б., Казанская Н. К., Дроздов А. А. Литейные сплавы на основе Ni₃Al и способ их выплавки // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. №1. С. 29 – 35.
15. Бунтушкин В. П., Каблов Е. Н., Базылева О. А., Морозова Г. И. Сплавы на основе алюминидов никеля // Металловедение и термическая обработка металлов. 1999. №1. С. 32 – 34.

INFLUENCE OF THE PRESSING PRESSURE ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF AN ALLOY BASED ON NICKEL ALUMINIDE, OBTAINING BY SINTERING OF VKNA POWDER BY THE SPS METHOD

Nemolochnov D.A., student, e – mail: drakon13chik@mail.ru

Shevtsova L.I., Ph.D., e – mail: edeliya@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, prospekt K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

This article is devoted to the study of the structure and properties of alloys based on nickel aluminide, VKNA type, obtained using the technology of spark plasma sintering. The mechanical properties of the samples were evaluated, namely, the durometric characteristics and the ultimate strength for a three-point bending. Based on the results of structural studies and evaluation of strength properties, it has been established that sintering parameters play an important role in the formation of the structure and properties of materials based on nickel aluminide, obtained by SPS-technology. An increase in the pressing pressure from 30 to 60 MPa ensures the production of materials with a relative density of up to 82 %. The maximum value of the ultimate bending strength is 490 MPa.

Keywords: intermetallic, spark plasma sintering, mechanical properties, nickel aluminide.

УДК 621. 92

**БОРИРОВАННЫЕ ПОРОШКИ ИЗ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ
МАГНИТНО – АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

*ПАНТЕЛЕЕНКО Ф. И.¹, доктор техн. наук, профессор, чл. - корр. НАН Б,
ПАНТЕЛЕЕНКО Е. Ф.¹, канд. техн. наук, доцент,
ПЕТРИШИН Г. В.², канд. техн. наук, доцент,
БЫСТРЕНКОВ В. М.*

*(Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь,
Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого, г. Гомель,
Республика Беларусь)*

¹**Пантелеенко Ф.И.** – 220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости,65,
Белорусский национальный технический университет,
e – mail: panteleyenkovfi@tut.by

²**Петришин Г.В.** – 246746, Республика Беларусь, г. Гомель, Пр-т Октября, 48,
Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого,
e – mail: grigpv@yandex.ru

Аннотация

В данной работе рассмотрены новые магнитно-абразивные материалы из борированных отходов производства дроби. Такие материалы отвечают всем предъявляемым к порошку-инструменту требованиям. Исследовано изменение морфологии частиц в процессе обработки, описаны процессы их деформирования и разрушения, а также приведены результаты исследования магнитных и технологических (производительность и стойкость порошка) свойств во взаимосвязи с толщиной боридного слоя.

Ключевые слова: порошок, отходы производства дроби, борирование, магнитно-абразивная обработка, магнитные свойства, морфология, разрушение, технологические свойства, производительность, шероховатость, стойкость, дисперсность, толщина боридного слоя.

Введение

На сегодняшнем этапе развития техники технология магнитно-абразивной обработки (МАО) широко применяется для финишной обработки. Специфика технологии обуславливает требования к применяемому порошку-инструменту, который одновременно должен сочетать: высокие твердость и производительность, стойкость (возможность выдерживать как можно большее количество циклов обработки), хорошие магнитные свойства, доступность и возможность серийного производства.

В настоящее время для МАО используют ферробор; ферровольфрам; бористый чугун; крошку белого чугуна; стальные закаленные иглы; механические смеси магнитных и абразивных порошковых материалов; металлизированные зерна электрокорунда [1]; ферромагнитные порошки с зернами оксида алюминия [2]; сферические ферромагнитные порошки, спеченные с техническими алмазами [3]; магнитно – реологические жидкости [4]. Однако, все указанные материалы, несмотря на то, что некоторые имеют высокую производительность, являются дорогими и сложны в изготовлении.

Разработанные ранее мелкодисперсные диффузионно – борированные порошки из отходов производства дроби [Ошибка! Источник ссылки не найден.Ошибка! Источник ссылки не найден.,6] отвечают этим требованиям и подходят для любых видов МАО: от грубого шлифования до полирования. Ферритная основа магнитна. Поверхностный боридный слой обеспечивает высокую твердость и производительность, более мягкая сердцевина – стойкость, а сырье в виде отходов – невысокую стоимость.

В данной работе исследованы процессы деформирования и разрушения частиц порошка-инструмента из борированных отходов дроби в процессе МАО, а также изучены их магнитные и технологические (производительность и стойкость) свойства исходя из толщины боридного слоя. На основании данных результатов можно сформулировать рекомендации по составу и области применения этих материалов.

Описание теоретических и экспериментальных методик

Исследование магнитных свойств порошка осуществляли с применением магнетометра с вибрирующим образцом фирмы Lakeshore. Магнитно – абразивную обработку образцов цилиндрической формы из улучшенной стали 45, проводили на лабораторной установке при одинаковых технологических режимах. Время одного цикла обработки – 30 секунд. Взвешивание производили на аналитических весах марки ВСЛ – 200/0,1А с точностью до $1 \cdot 10^{-7}$ кг. Перед взвешиванием образцы промывались в ацетоне (ГОСТ 2603 – 71). Шероховатость поверхности определялась на профилометре Сейтроник ПШ8 – 4С. Все полученные результаты подвергали обработке с использованием аппарата математической статистики. Исследования морфологии частиц и механизмов разрушения проведены с помощью спектрального электронного микроскопа JEOL JEM 1200 EX II.

Результаты и обсуждение

Магнитные свойства порошков исследовали для порошков фракции 400 – 630 мкм из колотого отбеленного серого чугуна СЧ 20 – исходного и подвергнутого диффузионному борированию. Характеристики образцов приведены в табл. 1. Для указанных в таблице порошков были построены петли гистерезиса, характеризующие магнитные свойства материала (рис. 1).

Таблица 1

Порошок для исследования магнитных свойств

| Продолжительность борирования, часов | Температура борирования, °С | Объемное содержание боридной фазы в порошке, % | Массовое содержание бора в порошке, % |
|--------------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------------------|
| 2 | 900 | 40,2 | 4,4 |
| 3 | | 55,4 | 6,1 |
| 4 | | 64,9 | 7,3 |

Все приведенные петли магнитного гистерезиса характеризуются очень малой площадью, что свидетельствует об магнитомягкости порошков. Коэрцитивное поле исходного порошка, больше, в то время, как магнитный момент насыщения (104) для этого материала примерно в 1,5 раза меньше, чем у борированных порошков ($\max = 167$, $\min = 157$). Такое различие вызвано отличием структуры порошков: исходный порошок обладает структурой белого чугуна, слабомагнитного при комнатной температуре, а борированный порошок содержит графит,

являющийся диамагнетиком (намагничивается против направления внешнего магнитного поля), поэтому, магнитный момент насыщения материалов, содержащих графит, увеличивается. Кроме того, боридные фазы железа имеют худшие магнитные свойства в сравнении с твердыми растворами железа.

Приведенные на рис. 1 результаты показывают, что толщина боридного слоя не оказывает значительного влияния на магнитные свойства порошка.

Технологические свойства диффузионно – борированных порошков на основе колотой чугуной дробы исследовали для фракций порошков, указанных в табл. 2, в которой также приведены их технологические характеристики по сравнению с известными порошками-инструментами для МАО.

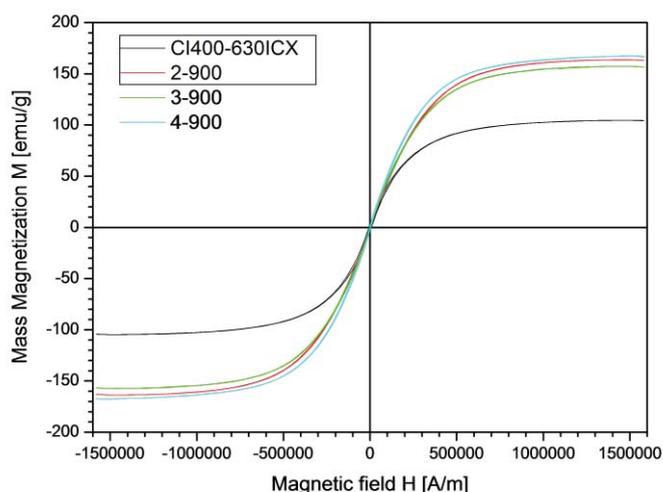


Рис. 1. Петли гистерезиса для порошков на основе колотой чугуной дробы фракции 400 – 630, подвергнутых диффузионному борированию при различных режимах

Результаты показывают, что предложенный порошок – инструмент практически по всем показателям превосходит применяемые в промышленности аналоги: он обладает более высокими производительностью, стойкостью, полирующей способностью, более технологичен в изготовлении. При этом отличается более низкой стоимостью.

Стойкость ферромагнитных абразивных материалов обеспечивается в первую очередь твердостью поверхности и вязкостью сердцевины частиц. Более вязкая и мягкая сердцевина в исследуемом порошке при разрушении уже не обеспечивает необходимых режущих свойств. Однако, такая особенная структура позволяет частицам дольше и эффективнее работать, обуславливая более медленное их разрушение. В данной работе были проведены исследования морфологии порошков до и после магнитно-абразивной обработки и описан механизм разрушения частиц.

Исследовали диффузионно – борированные порошки из колотой чугуной дробы (0,4 – 0,8 мм, борированные в течение 2 часов при температуре 900° С) с толщиной боридного слоя 20 – 30 мкм. Данный порошок – инструмент применяли для магнито – абразивной обработки образцов цилиндрической формы из стали 45 ГОСТ 1050 – 88, подвергнутой закалке и высокому отпуску, при различных режимах (время обработки 5 – 30 мин, частота вращения детали 400 – 630 мин⁻¹).

Результаты проведенных испытаний борированного порошка и металлизированного электрокорунда

| N п/п | Характеристика ферромагнитного абразивного материала | | | Технологические характеристики порошка, процесса шлифования и обработанной поверхности | | |
|---------------------------|--|-------------------------------------|--------------------------------------|--|-----------------------------------|---------------------------|
| | Ферромагнитный абразивный материал | Содержание бора в материале, мас. % | Диапазон размеров частиц порошка, мм | Производительность, мг/цикл | Шероховатость поверхности Ra, мкм | Стойкость порошка, циклов |
| Металлизированный порошок | | | | | | |
| 1 | Электрокорунд, металлизированный железом | - | 0,200...0,315 | 158±4 | 0,34±0,03 | 82±5 |
| 2 | Электрокорунд, металлизированный железом | - | 0,315...0,400 | 172±4 | 0,50±0,04 | 87±6 |
| Борированный порошок | | | | | | |
| 3 | Борированный порошок | 4,4±0,2 | 0,063...0,080 | 162±4 | 0,09±0,01 | 84±5 |
| 4 | Борированный порошок | 4,8±0,2 | 0,200...0,315 | 212±5 | 0,32±0,03 | 110±8 |
| 5 | Борированный порошок | 4,8±0,2 | 0,315...0,400 | 245±5 | 0,50±0,04 | 118±8 |

При MAO вследствие соударения частиц с обрабатываемой поверхностью и между собой происходят следующие процессы в приведенном порядке:

- разрушение микроразмерных игл поверхностных боридов (рис. 2, а), осколки которых скапливаются во впадинах на поверхности частиц (рис. 2, в, д) и при дальнейшей обработке выполняют полирующую функцию;

- появление на поверхности частиц постепенно растущих микротрещин (рис. 2, б, в), чему способствует пористость, твердость и хрупкость боридного слоя.

- выкрашивание микроигл боридов на поверхности частиц приводит к тому, что на поверхность выходят микропоры, находящиеся в боридном слое (рис. 2, г);

- выкрашивание более крупных элементов с поверхности (рис. 2, д) вследствие соединения образовавшихся на начальных стадиях трещин с порами в боридном слое;

- твердые выступающие части при соударении подвергаются скалыванию и сдвиговым деформациям, (рис. 2, е)

- деформирование мягких центральных областей частицы, вышедших на поверхность, носит пластический характер, если же на поверхности оказывается твердый подборидный слой, то характер его разрушения будет хрупким.

Дополнительным катализатором разрушения частиц при MAO являются графитные включения, локализующиеся в подборидном слое. При MAO с помощью порошка из колотой чугуновой дроби, борированного в течение 5 часов при температуре 900°С, что обеспечивает сквозное борирование и эффект полной графитизации, происходит ускоренное

разрушение частиц порошка. Это обусловлено высокой твердостью и, соответственно, хрупкостью пористого боридного слоя, а также наличием графитных включений, являющихся концентраторами напряжений. Разрушение частиц такого порошка происходит после 5 минут обработки детали диаметром 45 мм при частоте вращения 630 об/мин, в то время как разрушение борированных абразивных материалов с толщиной боридного слоя 20...30 мкм начиналось только после 15 минут работ при тех же режимах. Влияние толщины боридного слоя на стойкость порошка фракции 0,5 – 0,63 мм приведено на рис. 3. В качестве количественного критерия разрушения порошка принимали уменьшение не менее 80 % по массе его фракционного состава. Очевидно, увеличение времени борирования и, соответственно, толщины боридного слоя, приводит к постепенному снижению стойкости порошка.

Однако, в отличие от многих промышленных аналогов, разрушение исследуемого порошка в процессе МАО означает лишь переход его в другой фракционный состав. На рис. 4 показано изменение фракционного состава порошка колотой чугунной дроби исходной фракции 500...630 мкм, подвергнутого сквозному диффузионному насыщению бором.

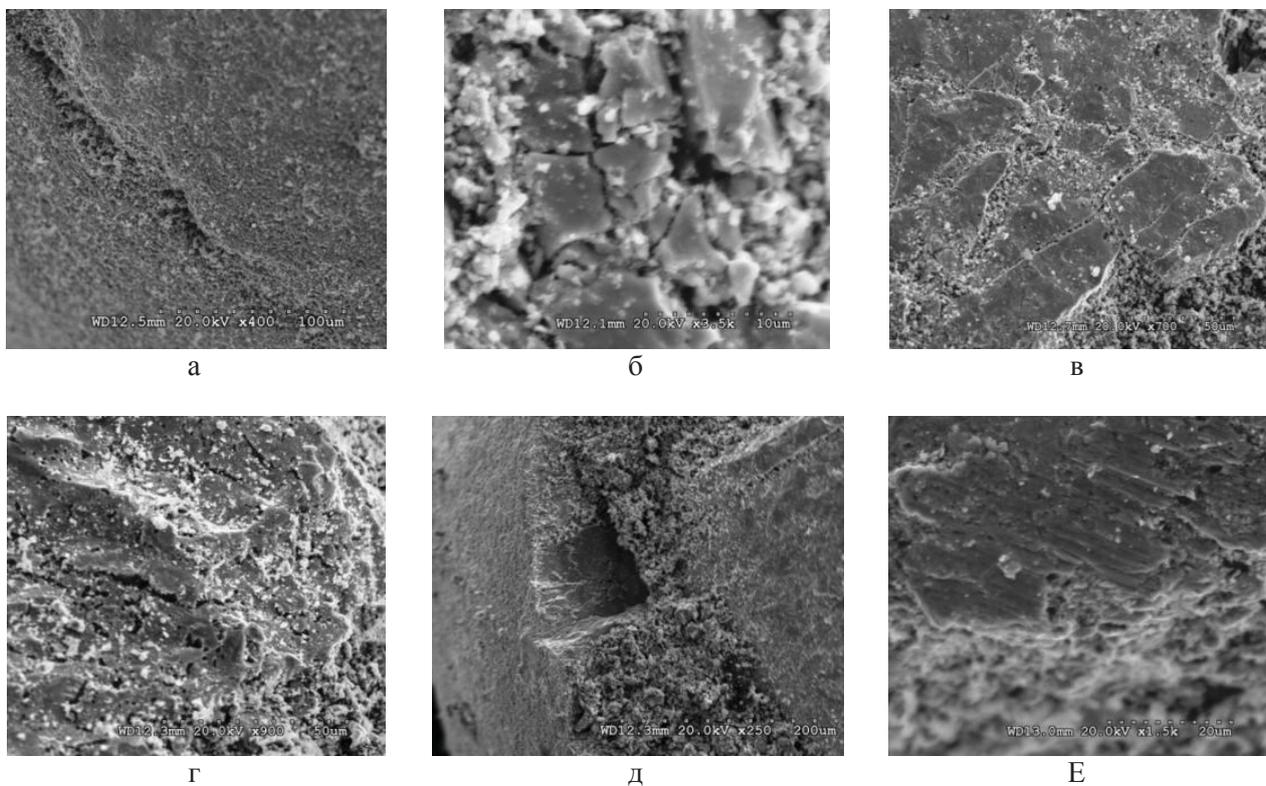


Рис. 2. Изменение морфологии частиц диффузионно – борированной колотой чугунной дроби в процессе магнитно – абразивной обработки

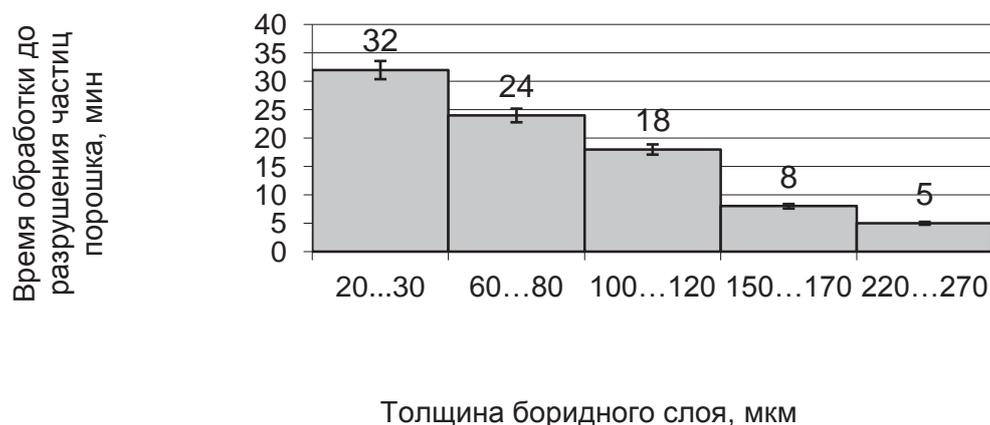


Рис. 3. Время магнитно – абразивной обработки диффузионно – борированными порошками на основе колотой чугуновой дроби фракции 500...630 мкм с различной толщиной боридного слоя

Разрушение частиц происходит достаточно быстро, и порошок фракции 650...720 мкм (размер частиц после борирования увеличивается за счет меньшей плотности боридных фаз) за 5 минут работы разрушается до фракции 500...630 мкм, а после 50 минут фракция порошка составляла 25...31,5 мкм. Порошок из светло-серого становился черным – графитные включения при разрушении перемешивались с порошком, оставаясь на поверхности частиц за счет электростатических сил.

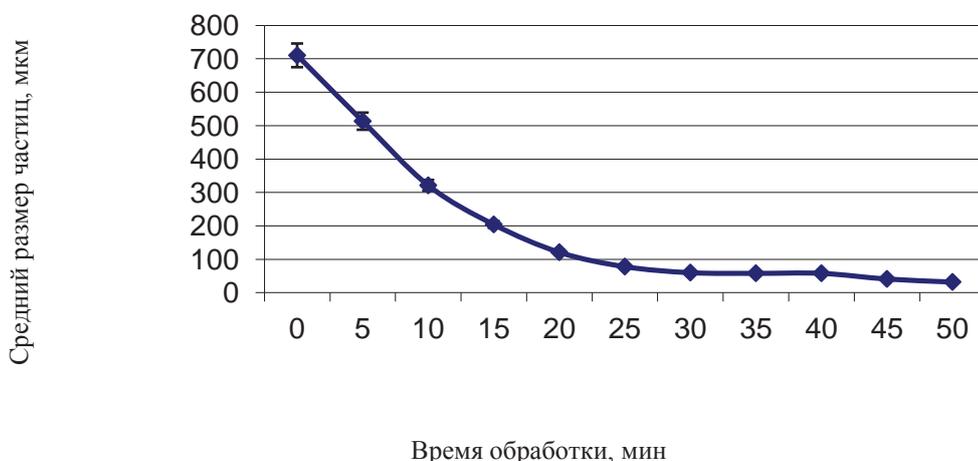


Рис. 4. Изменение фракционного состава диффузионно – борированного порошка во время магнитно – абразивной обработки

Производительность исследуемого порошка (рис. 5) снижается только в начале обработки, когда происходит разрушение частиц, и, соответственно, уменьшение глубины и длины царапин при микрорезании. Однако после 10...30 минут работы производительность возрастает до 505...508 мг/мин и остается на этом уровне до 35 минут обработки,

несмотря на продолжающееся разрушение порошка и уменьшение его фракционного состава. Объясняется это тем, что у данных порошковых материалов режущей частью является вся частица, а не абразивное зерно, как у спеченных материалов. Частица, разрушаясь, создает новые режущие кромки, участвующие в микрорезании. При этом повышаются магнитные свойства порошка и жесткость обработки за счет удаления из него немагнитного графита. Снижение производительности после 35 минут обработки объясняется как постепенным затуплением режущих кромок и уменьшением способности частиц порошка к микрорезанию, так и уменьшением шероховатости обрабатываемой поверхности и, соответственно, уменьшением площади контакта порошка с поверхностью.



Рис. 5. Изменение производительности обработки диффузионно – борированным порошком во время магнитно – абразивной обработки

Еще одна немаловажная характеристика порошка – инструмента – полирующая способность, результаты исследования которой приведены на рис. 6.

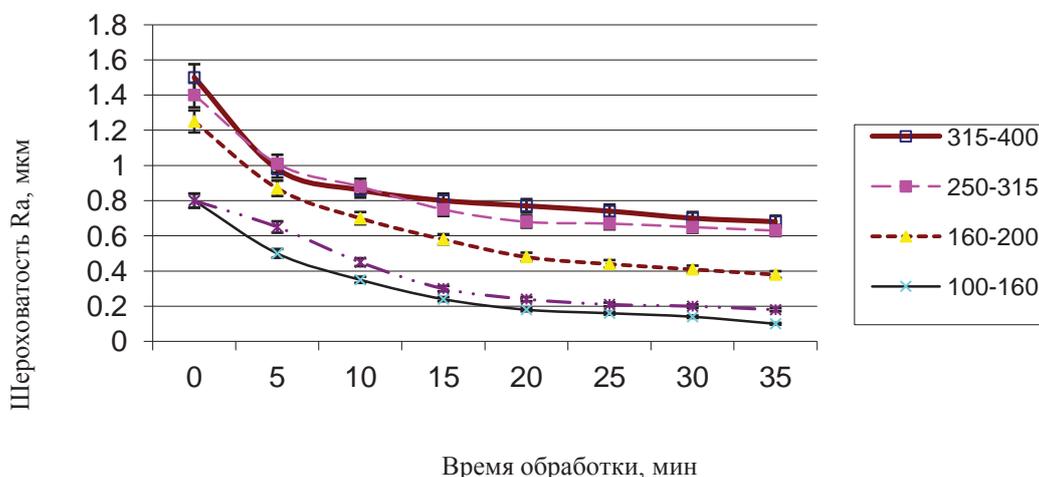


Рис. 6. Зависимость шероховатости поверхности во времени магнитно-абразивной обработки диффузионно – борированным порошком на основе колотой чугуной дроби различных фракций, порошком Fe – TiC фракции 100...125 мкм

В данной работе проводились сравнительные исследования по влиянию фракционного состава и времени обработки на шероховатость обработанной поверхности. В качестве порошка-эталоны был принят порошок Fe – TiC фракционного состава 0,100...0,125 мм. Как показывает график, диффузионно – борированные порошки крупных фракций обеспечивают снижение шероховатости до Ra 0,40...0,63, что соответствует шероховатости при обработке шлифовальными материалами на жесткой связке. Порошок мелкого фракционного состава обеспечивает достижения шероховатости Ra 0,10...0,13, соответствующей полированной поверхности. Почти аналогичную шероховатость обеспечивает порошок Fe – TiC такой же фракции, однако он обладает меньшей производительностью (для получения указанной шероховатости длительность обработки должна быть не менее 45 минут).

Выводы

Предложенный порошок из диффузионно – борированных отходов чугуна обладает оптимальным сочетанием свойств, предъявляемых к порошку – инструменту для MAO. В данной работе установлено следующее:

- хорошие магнитные свойства порошка не зависят от толщины боридного слоя;
- описаны процессы разрушения частиц при MAO;
- по сравнению с промышленными аналогами порошок обладает более высокими производительностью и полирующей способностью;
- режущая способность и производительность насквозь борированного порошка не зависят от времени работы, а постепенное измельчение частиц обеспечивает более низкую шероховатость обрабатываемой поверхности. Более того, в процессе обработки можно получить микродисперсные абразивные материалы фракции менее 80 мкм. Однако загрязненность графитом делает возможным применение такого порошка только для наружных легко очищаемых поверхностей.

Таким образом, критическим показателем, определяющим возможность применения диффузионно – борированных порошков для MAO является толщина боридного слоя, и для широкого универсального применения рекомендуется использовать порошковые материалы, имеющие толщину боридного слоя от 10 до 30 мкм в зависимости от размера исходных частиц.

Список литературы

1. Ящерицын П.И., Забавский М.Т., Кожуро Л.М., Акулович Л.М. Алмазно – а разивная обработка изделий в магнитном поле. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 272 с.
2. Hanada K. and Yamaguchi H.: Development of Spherical Iron-based Composite Powder with Carried Alumina Abrasive Grains by Plasma Spray, *Advanced Materials Research*, Vol. 75 (2009), pp.43 – 46.
3. Hanada K., Yamaguchi H., and Zhou H.: New Spherical Magnetic Abrasives with Carried Diamond for Internal Finishing of Capillary Tubes, *Diamond and Related Materials*, Vol. 17 (2008), pp.1434 – 1437.
4. Sato T., Yamaguchi H., Shinmura T., and Okazaki T.: Study of Internal Finishing Process for Capillary using Magneto-rheological Fluid, *J. Jpn. Soc. Prec. Eng.*, Vol. 75, No. 5 (2009), pp. 612 – 616.
5. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 300 с.
6. Ферромагнитный абразивный материал. Патент РБ 16981. МПК8, С9К3/14, В24Д3/34, С23С8/68. Пантелеенко Ф. И.; Петришин Г. В., Быстренков В. М., Демиденко Е. Н., Пантелеенко А. Ф. Опубл. 30.04.2013// Аф. Бюл./ Нац. Цэнтр інтэлектуал. Уласнасці – 2013 №2. С.104 – 105.

**BORATED POWDERS MADE OF WASTE PRODUCTS FOR
MAGNETIC – ABRASIVE FINISHING**

Panteleyenko F.I.¹, D. Sc, prof,corr. member of NAS of Belarus, e – mail: panteleyenkofi@tut.by

Panteleyenko K.F.¹, C. Sc, Associate Professor, e – mail: panteleyenko@inbox.ru

Petrishin G.V.², C. Sc, Associate Professor, e – mail: grigpv@yandex.ru

Bystrenkov V.M.², e – mail: grigpv@yandex.ru

¹Belarusian national technical university, 220013, Republic of Belarus, Minsk, Nezavisimosti ave.,65;

²Sukhoi State Technical University of Gomel, 246746, Republic of Belarus, Gomel, Oktiabria ave., 48

Abstract

In this paper the new magnet – abrasive materials made of borated fraction production waste products are overviewed. This products satisfy all requirements for powder-tool. Morphology changes of powder particles surface during magnetic-abrasive finishing was under investigation as well as magnetic and technological (productivity and durability) properties in accordance with borated layer thickness.

Keywords: powder, fraction waste products, borating, magnetic – abrasive finishing, magnet properties, morphology, destruction, technological properties, productivity, roughness, durability, dispersity, borated layer thickness.

УДК 621.9:536.75

**ФИЗИКО – ХИМИЧЕСКИЙ СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ:
ЭВОЛЮЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О СТРОЕНИИ МАТЕРИАЛОВ**

*ХЕЙФЕЦ М. Л.^{1,2}, доктор техн. наук, профессор,
заместитель академика – секретаря, гл. науч. сотрудник,
КОЛМАКОВ А. Г.³, чл.-кор. РАН, доктор техн. наук, профессор,
заместитель директора,
КЛИМЕНКО С. А.⁴, доктор техн. наук, профессор,
заместитель директора*

(¹Президиум НАН Беларуси, Минск;

²ГНПО «Центр» НАН Беларуси, Минск;

³Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва;

⁴Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев)

Хейфец М.Л. – 220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 66,
е – mail: mlk-z@mail.ru

Аннотация

Выявлены этапы развития физико – химических основ материаловедения и определены состояние и перспективы развития наноструктурного материаловедения, опирающегося на комплексное изучение строения вещества на различных масштабных уровнях. Применение комплексного анализа образования структур материалов, характеризуется: традиционным для химии и физики изучением баланса потоков вещества и энергии, дополненным анализом производства энтропии; заложенной физико-химическим анализом комбинаторной топологией, используемой для описания неравновесных фазовых переходов; базирующимися на синергетическом подходе перколяционными представлениями фрактальной геометрии, применяемыми для описания комплекса структур.

Показано, что для изучения неравновесных процессов синтеза и применения микро- и наноструктурных материалов целесообразно дополнить принципы физико – химического анализа: непрерывности – рассмотрением диссипации энергии при формировании структур и фаз; соответствия – фрактальными представлениями геометрических образов; совместимости – изучением возможных путей эволюции системы. Это позволяет количественно анализировать переходные процессы, описываемые нецелочисленными значениями степеней свободы системы и формирующиеся структуры с мультифрактальными фазовыми параметрами.

Ключевые слова: физико – химический структурный анализ, химическая неупорядоченность вещества, неравновесная термодинамика процессов, синергетический подход, мультифрактальные параметры, наноструктурные материалы.

Введение

При синтезе и применении конструкционных и функциональных материалов традиционно используются физико – химический и структурный анализы формирующихся и распадающихся фаз в многокомпонентных композициях. Перспективы новых возможностей создаваемых наноматериалов, аддитивных и синерготехнологий синтеза композиционных материалов и изделий обусловили поста-

новку задач и анализ путей их решения в физико-химическом материаловедении, потребовали комплексного системного изучения строения материала на различных масштабных уровнях [1 – 4]

В этой связи цель проведенных исследований - выявление главных этапов и перспектив совершенствования физико – химических основ материаловедения и определение на базе этого анализа состояния и путей развития микро- и наноструктурного материаловедения, опирающегося на комплексное изучение строения вещества на различных масштабных уровнях. Использование эволюции представлений, перспектив развития и соответствующих им описаний строения вещества позволит создавать новые и развивать существующие технологии получения и обработки материалов.

Анализ эволюции в представлениях о строении материалов

В эволюции представлений о строении материалов в конденсированном состоянии выделяются длительные крупные этапы, связанные с развитием физики, химии и материаловедения, а также с использованием в этих науках математического аппарата для описания изучаемых процессов и объектов [5].

Первый этап связан со становлением основ химической науки, с формированием представлений о химической упорядоченности веществ и их кристаллическом строении в твердом агрегатном состоянии.

Второй этап развития базируется на физико-химическом анализе, рассматривающем фазовый состав, структуры и свойства, обусловленные химической неупорядоченностью и дефектами кристаллической решетки.

Третий этап зарождается с появлением микро-, нано- и других структурных представлений и определяется комплексным анализом строения вещества на различных масштабных уровнях. Он основывается на термодинамике неравновесных процессов синтеза и деградации структур материала и связан с анализом образования сложных промежуточных фаз и смешанных переходных структур.

Химическая упорядоченность и кристаллическое строение вещества

Окончательное формирование представлений о строении вещества на первом этапе можно связать с введением в 1814 г. Й.Я. Берцелиусом химической символики [6].

Становлению этих представлений, предшествовало создание в 1793 г. И.В. Рихтером «Начальных оснований стехиометрии», в которых он использовал для реакций знаки сложения и вычитания веществ [7], а также формулировка Дж. Дальтоном на рубеже XIX века закона кратных отношений в «Новой системе химической философии», развивающая его атомистические представления [6].

Однако уже в 1801 г. К.Л.Бертолле в «Исследовании законов сродства», а затем в 1803 г. в «Опытах химической статики» указывал, что состав образующихся соединений должен быть переменным, а в 1799 г. он отмечал, что химическое сродство зависит от массы реагирующих веществ и от условий реакции [6]. При этом следует отметить, что еще в 1752 г. М.В.Ломоносовым предпринимались попытки исходя из зависимости свойств от состава системы установить образование в ней химического соединения.

Вместе с тем спор К.Л.Бертолле с соотечественником Ж.Л.Прустом в первом десятилетии XIX в. (с 1801 по 1808 гг.) закончился установлением закона постоянства состава, так как в глазах большинства современников доказательства Ж.Л.Пруста по результатам опытов на сульфидах и оксидах металлов казались более вескими, чем аргументы К.Л.Бертолле.

Спустя столетие ретроспективную оценку этой дискуссии дал А.Ле Шателье: «Вследствие ясности, которая была внесена в химию понятием об определенном соединении, исследователи обратились на долгое время к изучению именно этих веществ. Соединения переменного состава, жидкие и твердые растворы были оставлены без внимания, между тем как важность и интерес подобных тел в смысле исследования явлений природы ничуть не меньше» [7].

Физико – химический анализ строения структур и фаз

Начало новому методу исследования растворов и сплавов положил Н.С. Курнаков, который в 1913 г. в совместной с С.Ф.Жемчужным статье «Давление истечения и твердость пластичных тел» определил его как физико-химический анализ. Метод физико-химического анализа позволяет выявить состав веществ, образующихся в растворах, не выделяя этих веществ из систем и не делая их анализа [8].

В 1912 г. Н.С. Курнаков показал, что существует класс соединений, не подчиняющихся законам постоянства состава и кратных отношений, и назвал их бертоллидами, химические соединения определенного постоянного состава названы им дальтонидами.

Созданию физико – химического анализа предшествовали фундаментальные результаты, полученные Д.И. Менделеевым в 1856 г. при исследовании растворов, а также сформулированный им в 1869 г. Периодический закон [6]. Структурные превращения в сплавах Д.К. Чернов в 1868 г. связал с критическими температурными точками, а физико-химическую теорию металлургических процессов в 1902 г. предложил А.А. Байков [6, 7].

В основу физико – химического анализа Н.С. Курнаковым положено правило фаз, сформулированное Гиббсом в работах с 1873 по 1875 гг. в теории равновесия неоднородных систем, а также определения в ней фаз и компонентов [8].

«Современный подход в развитии физико-химического анализа начинается с 1873 – 1878 гг., когда были напечатаны классические мемуары Гиббса. Здесь были введены впервые новые понятия о фазах и компонентах, которые имели впоследствии громадное значение для изучения химических равновесий. Эти понятия и связи со знаменитым правилом фаз Гиббса внесли сюда единство и простоту и послужили основанием для классификации сложных явлений», - отмечал Н.С. Курнаков [7].

Идеи Гиббса в области фазовых равновесий нашли практическое применение в работах А.Ле Шателье, Я.Х. Вант-Гоффа, Я. Ван-Лаара, Б.С. Розенбома, И.Ф. Шредера, Д.П. Коновалова, В.Ф. Алексеева и др.

Основные принципы физико-химического анализа сформулированы Н.С. Курнаковым в 1913 г. [9]. Согласно первому принципу соответствия, каждой совокупности фаз, находящейся в данной системе в равновесии, в соответствии с правилами фаз на диаграмме отвечает определенный геометрический образ. Согласно второму принципу непрерывности, при непрерывном изменении параметров, определяющих состояние системы, свойства отдельных ее фаз изменяются непрерывно.

Работы Н.С. Курнакова по физико – химическому анализу развили его коллеги и ученики: Н.И. Подкопаев, Н.И. Степанов, Н.Н. Ефремов, Г.Г. Уразов, С.А. Погодин, В.Я. Аносов и др. Для анализа как гомогенных, так и гетерогенных систем Я.Г. Горощенко в 1978 г. был предложен третий принцип совместимости, в соответствии с которым любой набор компонентов независимо от их числа и физико – химических свойств может составить систему [10].

Существенное влияние дисперсности и особенностей микро-, нано- и другого структурного строения материалов, наследования и передачи их свойств при интенсивных воздействиях потребовало дополнить физико-химический анализ свойств материалов их комплексным анализом на различных масштабных уровнях.

Неравновесная термодинамика и комплексный анализ перколяционных структур

Зарождение нового этапа в материаловедении происходило в конце XX в., и связано с фундаментальными работами ученых научных школ, сформированных в советское время: Ю.К. Ковнеристым, Ю.Д. Третьяковым, (Москва), В.А. Лихачевым (Санкт – Петербург), В.Е. Паниным (Томск), Н.В. Новиковым (Киев), П.А. Витязем (Минск) и др.

Особая роль в консолидации взглядов ученых различных научных школ и объединении их совместных усилий принадлежит Институту металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (Москва). Начальные работы, под руководством И.А. Одингга по дислокационным представлениям в кристаллических структурах, переросли в работы В.С. Ивановой по фрактальному материаловедению [16, 17]. Принципы фрактального и синергетического описания структур и процессов их формирования были развиты в работах: Г.В. Встовского, А.Г. Колмакова, (Москва), И.Г. Грабара (Житомир), С.А. Клименко (Киев), М.Л. Хейфеца (Минск) и др. Методы определения фрактальной размерности и использования представлений о регулярных фракталах для описания и моделирования природных структур даны в работах [16 – 22].

Новые методы в материаловедении базируются на синергетическом подходе к нелинейным явлениям в сложных системах Г. Хакена [23], в основе которого лежит фундаментальная теорема Пригожина – Гленсдорфа [24].

Фрактальный анализ структур материалов базируется на теореме Рамсея, согласно которой любое достаточно большое множество элементов структуры обязательно содержит высокоупорядоченную структуру. Это означает, что любую структуру, содержащую достаточно большое количество элементов, можно рассматривать как мультифрактал, составленный из конечного числа вложенных друг в друга самоподобных структур [17].

Реальные структуры материалов являются стохастическими фракталами, т.е. самоподобными только в среднем. Поэтому диссипативные структуры не поддаются простому анализу на основе исследования одного только геометрического самоподобия с использованием величины фрактальной размерности [19, 25, 26]. В настоящий момент можно утверждать, что в природе не существует абсолютно фрактальных или не фрактальных структур. Все структуры рассматриваются как потенциально мультифрактальные с той или иной степенью адекватности применения мультифрактального описания.

Теория фракталов хорошо отражает специфику структуры кластеров и перспективна для описания свойств сильно неоднородных материалов. По своей исходной постановке ей подобна теория перколяции, разработанная для описания поведения систем вблизи топологических фазовых переходов. Важнейший параметр перколяционной системы – порог перколяции, при прохождении через который количество переходит в качество [27, 28].

В системе выделенных элементов или частиц с ростом их концентрации появляются группы связанных частиц – кластеры. При дальнейшем росте количества частиц их агрегация принимает лавинообразный характер и происходит одновременно по нескольким схемам: частица – частица, частица – кластер и кластер – кластер. В завершение связность частиц, вызванная появлением перколяционного гиперкластера, простирающегося через всю систему, становится глобальной и образовавшаяся структура начинает играть роль новой самостоятельной фазы.

Многомасштабность такой агрегации подразумевает, что различные иерархические уровни процесса взаимосвязаны. Поэтому для описания агрегации частиц в системе введен радиус корреляции, характеризующий пространственный масштаб кластера [27]. Плотность фрактального кластера связана в свою очередь, как со средним радиусом частиц, так и с фрактальной и евклидовой размерностями пространства. В результате критические показатели теории перколяции, описывающие то-

пологический фазовый переход, позволяют определить фрактальную размерность перколяционных кластеров [19, 29].

В настоящее время структурный физико-химический анализ составляет основу системного подхода к описанию материалов, технологий их получения, обработки и эксплуатации [1, 30].

Физико – химический структурный анализ строения материалов

Ввиду неравновесности быстропротекающих процессов синтеза и применения материалов как на макро- и мезо-, так и на микро- и наноструктурном уровнях, их диаграммы состояния носят метастабильный характер [3]. Анализ диаграмм состояния усложняется тем, что процессы протекают в короткие промежутки времени, в весьма ограниченных объемах, при высоких градиентах давления и температур, в присутствии активных примесей, зачастую играющих роль катализаторов [1]. Вследствие этого сложно определить на диаграммах состояния не только положения точек и линий, описывающих фазовые переходы, но и их количество, возрастающее в результате образования промежуточных фаз или переходных структур [1, 3].

Основные принципы физико-химического анализа

Согласно принципу непрерывности свойств физико – химической системы, при непрерывном изменении параметров, выражающих состояние системы, свойства отдельных ее фаз изменяются непрерывно, в то время как свойства системы, взятой в целом, изменяются также непрерывно, но при условии, что не возникают новые фазы и не исчезают старые [31].

Принцип непрерывности затрагивает процессы образования и распада фаз физико-химической системы, описываемые уравнением Гиббса [8]:

$$\Phi = K + \Pi - C,$$

где Φ – число однородных фаз, под которыми подразумеваются массы, отличающиеся по составу и по термодинамическим свойствам; K – число компонентов, т.е. число веществ, достаточных для того, чтобы определить состав любой фазы; Π – число переменных налагаемых полей (давления, температуры, гравитационных, электрических, магнитных и др.); C – число степеней свободы, т.е. число параметров, которые можно произвольно изменять без изменения числа фаз системы [4].

Согласно принципу соответствия модели физико – химической системе, каждому составу фаз, находящихся в данной системе в равновесии, соответствует на диаграмме определенный геометрический образ. Физико – химическая диаграмма представляет собой замкнутый комплекс точек, линий, поверхностей и других геометрических образов; причем понятию комплекса в диаграмме соответствует понятие системы, и разные элементы комплекса находятся во взаимном однозначном соответствии с элементами системы [31].

Следуя принципу соответствия, представив традиционно: компоненты K физико-химической системы – точками диаграммы, которые образуют для комплекса узлы графа или вершины B многогранника; переменные, налагаемые на систему поля Π , – поверхностями или гранями Γ комплексов. Образующиеся при появлении новых и исчезающие при распаде старых фаз Φ линии соединения вершин B или пересечения граней Γ целесообразно обозначить ребрами P формируемого графа или многогранника.

При этом необходимо отметить, что вместо соответствий $K \rightarrow B$ и $\Pi \rightarrow \Gamma$ можно рассматривать $K \rightarrow \Gamma$ и $\Pi \rightarrow B$. Это возможно в силу того, что образующиеся ребра P графа могут быть получены как соединением вершин B , так и пересечением граней Γ [32].

Согласно принципу совместимости системы трансляцией частных подсистем любой набор компонентов, независимо от их числа и физико-химических свойств, может составить систему. Из этого следует, что диаграмма любой системы содержит все элементы частных подсистем, из которых она составлена. В общей системе элементы частных подсистем совмещаются на диаграмме с геометрическими образами, возникающими как отображение процессов, протекающих с участием всех компонентов общей системы [10].

Из принципа совместимости вытекает обратный вывод о том, что многокомпонентная система не может быть разделена на совершенно чистые компоненты, не содержащие примеси других компонентов, так как в естественных условиях любое вещество находится в смеси, представляющей собой многокомпонентную систему [9, 10].

Формирующийся геометрический образ можно рассматривать как многомерный граф или многогранник, проекция которого на плоскость – многоугольник – также представляет собой замкнутый граф. Если граф вложим в плоскость и он состоит из связанных кусков, общее число которых C_b , то граф разбивает плоскость на определенное число областей, граней Γ [33]:

$$\Gamma = C_b - V + P + 1$$

Тогда для связанного графа начерченного на сфере ($C_b = 1$), справедливо равенство, называемое формулой Эйлера:

$$V + \Gamma - P = 2 = C_b + 1 = X,$$

В частности, это соотношение справедливо для любого выпуклого многогранника. Число X называется эйлеровой характеристикой многогранника и показывает, сколько вмятин, заканчивающихся дырками, или сквозных отверстий имеет многогранник. Количество дырок определяется соотношением $d_0 = 1 - X/2$ [32, 33].

Термодинамика неравновесных процессов в диссипативной системе

Уравнение Гиббса предназначено для анализа замкнутой, равновесной физико-химической системы [8]. Вместе с тем оно применимо и для открытой системы, когда внешние потоки энергии и вещества рассеиваются диссипативными структурами [34].

Функция диссипации ψ при абсолютной температуре T и производство энтропии σ [24, 35]:

$$\psi = T\sigma = T d\varepsilon/d\tau$$

вследствие второго начала термодинамики возрастают ($\psi \geq 0, \sigma \geq 0$) во времени τ .

В замкнутых условиях, в процессе эволюции с $d\varepsilon \geq 0$, система движется к состоянию равновесия, в котором $\varepsilon = \max, d\varepsilon = 0$; при этом производство энтропии не возрастает $d\sigma \leq 0$.

В открытой системе условие эволюции сохраняется $d\sigma^* \leq 0$, а условие равновесия предполагает $\sigma = \min, d\sigma = 0$; при производной по времени:

$$d\sigma / d\tau \leq 0$$

Согласно фундаментальной теореме Пригожина – Гленсдорфа [24] при эволюции во времени τ к стационарному состоянию, произвольные системы с неизменяемыми по времени краевыми усло-

виями выполняют: $d\sigma \leq 0$ – условие эволюции; $d\sigma = 0$ – условие стационарности; $\delta\sigma \geq 0$ – условие устойчивости.

В результате уравнение Гиббса с ограничениями по производству энтропии, согласно фундаментальной теореме Пригожина – Глендсдорфа, позволяет рассматривать открытые неравновесные системы [3, 34].

Так как между физико-химической системой произвольного, неограниченного состава, описываемой уравнением Гиббса: $K + \Pi - \Phi - C = 0$, и диаграммой состояния – геометрическим образом системы любой размерности, описываемой формулой Эйлера: $V + \Gamma - P - X = 0$, существует взаимно однозначное соответствие, то следует рассматривать степени свободы C системы как эйлеровы характеристики многогранника: $X = C = C_v + 1 = 2 - 2d_0$ [3].

Число связанных кусков графа C_v и количество дырок d_0 геометрического образа позволяют выделить группы взаимозависимых параметров в физико-химической системе [32].

В процессах синтеза и применения материалов при неизменном числе компонентов K используемых веществ и потоков Π вносимой энергии управлять формирующимися фазами Φ , согласно уравнению Гиббса, позволяют степени свободы C системы [34].

Фрактальная размерность диссипативной системы

Вследствие чувствительной зависимости от начальных условий (ЧЗНУ), состояние физико-химической системы рационально представить в виде аттрактора. ЧЗНУ требует размерности аттрактора, удовлетворяющей неравенству $C > 2$ [35].

Вместе с тем трехмерный поток в фазовом пространстве для того, чтобы обладать ЧЗНУ должен обеспечивать $C < 3$, так как объемы в фазовом пространстве сокращаются со временем в случае диссипативной системы (т.е. системы, обладающей аттрактором). Следовательно, объем аттрактора должен быть равен нулю, что в трехмерном фазовом пространстве приводит к неравенству $C < 3$ [35, 36].

Аттрактор, который может представлять хаотический режим (и тем самым обладать ЧЗНУ), должен быть таким, чтобы выполнялось неравенство $2 < C < 3$. Аттракторы, удовлетворяющие этому неравенству, обладают нецелой фрактальной размерностью [17, 36].

Таким образом, можно утверждать, что диссипативная динамическая система может стать хаотической, если размерность фазового пространства больше двух. Такой хаос (с малым числом степеней свободы) обусловлен ЧЗНУ траекторий на странном аттракторе. В результате во избежание непредсказуемости поведения детерминированных потоков энергии и вещества при их диссипации системе нужно предоставлять менее трех степеней свободы.

Возникновение новых и исчезновение старых фаз и структур при условии прерывистого, скачкообразного изменения состояния, ставят вопрос о структурно – фазовой устойчивости физико – химической системы. Это требует исследования состояния диссипативной системы в окрестностях замечательных точек диаграмм (минимумов, максимумов, точек перегиба, эквипотенциальных, эвтонических) и особенно сингулярных точек, в которых физико-химический состав сохраняется с изменением внешних условий.

Сингулярные точки, показывают на диаграмме образование новых, недиссоциированных, химических соединений – дальтонилов. В отличие от дальтонилов частично диссоциированные соединения – бертолиды – формируют максимумы и минимумы на линиях, но не образуют особых точек на диаграмме [31].

Самоорганизация структурных изменений и фазовых переходов

Согласно принципу соответствия, на диаграмме каждой фазе должен отвечать определенный геометрический образ, а в соответствии с принципом непрерывности, этот образ должен быть непрерывным. Однако при образовании недиссоциированного соединения жидкой фазе соответствует не одна, а две кривые, сингулярная точка пересечения которых показывает состав образующегося химического соединения.

Для устранения этого противоречия Н.С. Курнаковым и С.Ф.Жемчужным было предложено считать эти две линии за две ветви одной и той же кривой, которая пересекает сама себя. В этом случае пересечение является двойной узловой точкой, в окрестности которой следует рассматривать устойчивость формирующихся состояний системы [31].

Необходимо отметить, что петля, добавленная в сингулярной точке, не является чисто гипотетической. Образование петли показывает, согласно принципу совместимости, процесс формирования нового недиссоциированного химического соединения из диссоциированного в растворе, т.е. превращение бертолидов в дальтониды, с образованием сингулярной точки, при котором число степеней свободы S системы не изменяется [31].

Вместе с тем образование сингулярных точек создает предпосылки для формирования новых связей (фаз, структур и т.п.) и в результате может изменить число степеней свободы S системы [3, 32]. Так, достаточно часто в физико-химических системах при температурах промежуточных между температурами плавления двойных, тройных и других эвтектик может расти число степеней свободы. В результате создаются условия для распада системы на независимые подсистемы, путем разрыва связей между компонентами и выделения обособленных фаз, структур и других образований.

Таким образом, исследование открытой физико-химической системы с позиций неравновесной термодинамики по элементам диаграмм состояний, согласно топологической модели, позволяет рассматривать процессы самоорганизации при образовании структур и фаз, определять пути эволюции и выделять устойчивые состояния системы [3].

Физико-химическая система находится в состояниях, которым вследствие чувствительной зависимости от начальных условий для возникновения хаотического режима достаточно превышения двух степеней свободы ($S > 2$). При числе степеней свободы $S \geq 3$ система переходит в неустойчивый режим, стабилизация которого достигается снижением числа степеней свободы в нескольких ($S_v = S - 1$) стационарных состояниях. Стабилизация состояний системы при неустойчивых режимах может быть обеспечена переходом физико-химических превращений на иной структурный уровень ($S = 0 \rightarrow S_v = -1$).

Существуют основные пути эволюции физико-химической системы: на одном последовательность наследуемых состояний имеет нечетное число степеней свободы ($S = 2n + 1$, где $n = 0, 1, 2, \dots$), а на другом – состояния с четным числом ($S = 2n$). Переход системы с одного пути эволюции на другой возможен при формировании в системе особых или сингулярных элементов с их последующим обособлением (т.е. при введении новых структур или образовании в системе недиссоциированных структур из диссоциированных).

Выводы

На современном этапе все шире применяется комплексный анализ образования структур материалов, характеризующийся: традиционным для химии и физики изучением баланса потоков вещества и энергии, дополненным анализом производства энтропии; заложенной физико-химическим анализом комбинаторной топологией, используемой для описания неравновесных фазовых переходов; базирующимся на синергетическом подходе перколяционными представлениями фрактальной геометрии, применяемыми для описания комплекса структур.

В результате для изучения неравновесных процессов синтеза и применения материалов изделия на микро- и наноструктурном уровнях целесообразно дополнить основные принципы физико-химического анализа: непрерывности – рассмотрением диссипации энергии при формировании структур и фаз; соответствия – фрактальными представлениями геометрических образов; совместности – изучением возможных путей эволюции системы.

Развитие принципов физико-химического анализа позволяет количественно анализировать переходные процессы и структуры, описываемые нецелочисленными значениями S - степеней свободы системы и мультифрактальными параметрами Φ - формирующихся фаз.

Использование мультифрактального формализма для описания строения материала на микро- и наноструктурном уровнях создает предпосылки для объединения моделей формирования непрерывных пространственно-распределенных свойств вещества на макро- и мезоуровнях с дискретными моделями атомарного строения, основанными на квантово-механических представлениях.

Список литературы

1. Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / Под общ. ред. П.А. Витязя и К.А. Солнцева. Мн., 2011.
2. Васильев А.С. и др. Технологические основы управления качеством машин. М., 2003.
3. Хейфец М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. М., 2005.
4. Колмаков А.Г. // Нелинейный мир. 2006. Т.4, №3. С.126 – 136.
5. Хейфец М.Л. // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 12-го Международного науч. – техн. семинара. Киев, 2012. С.293 – 298.
6. Неорганическая химия / И. П. Алимарин, гл. ред. М., 1975.
7. Штейнберг А.С. Репортаж из мира сплавов. М., 1989.
8. Гиббс Дж.В. Термодинамические работы. М.; Л., 1950.
9. Курнаков Н.С. Введение в физико-химический анализ. М.; Л., 1940.
10. Горощенко Я.Г. Физико-химический анализ гомогенных и гетерогенных систем. Киев, 1978.
11. Павлов Н.Н. Теоретические основы общей химии. М., 1978.
12. Арзамасов Б.Н. и др. Научные основы материаловедения. М., 1994.
13. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / Под общ. ред. П.А.Витязя. Мн., 2010.
14. Гордиенко А.И. и др. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки. Мн., 2000.
15. Витязь П.А. и др. Функциональные материалы на основе наноструктурированных порошков гидроксида алюминия. Мн., 2010.
16. Иванова В.С. Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов. М., 1992.
17. Иванова В.С. и др. Синергетика и фракталы в материаловедении. М., 1994.
18. Кочин П.Я. и др. Простые отношения в природе. Пропорциональность, инвариантность, подобие. М., 1996.
19. Встовский Г.В. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. Ижевск, 2001.
20. Mandelbrot B.B. The fractal geometry of nature. New York, 1983.
21. Feder J. Fractals. New York, 1988.
22. Бунин И.Ж., Колмаков А.Г., Встовский Г.В., Терентьев В.Ф. // Материаловедение. 1999. №2. С.19 – 26.
23. Naken H. Advanced Synergetics. Berlin, 1993.
24. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации. М., 1973.

25. Бунин И.Ж., Колмаков А.Г., Встовский Г.В., Терентьев В.Ф. // *Материаловедение*. 2000. №1. С.16 – 25.
26. Встовский Г.В. *Элементы информационной физики*. М., 2002.
27. Кулак М.И. *Фрактальная механика материалов*. Мн., 2002.
28. Челидзе Т.Л. *Методы протекания в механике геоматериалов*. М., 1987.
29. Клименко С.А., Мельничук Ю.А., Встовский Г.В. *Фрактальная параметризация структуры материалов, их обрабатываемость резанием и износостойкость режущего инструмента*. Киев, 2009.
30. Витязь П.А. и др. // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2012. №1. С.53 – 64.
31. Аносов В.Я., Озерова М.И., Фиалков Ю.Я. *Основы физико-химического анализа*. М., 1976.
32. Хейфец М.Л. // *Докл. АН Беларуси*. 1995. Т. 39. № 6. С.109.
33. Понтрягин Л.С. *Основы комбинаторной топологии*. М., 1986.
34. Хейфец М.Л. // *Докл. АН Беларуси*. 1995. Т. 39. № 2. С.109.
35. Берже П., Помо И., Видаль К. *Порядок в хаосе: О детерминистическом подходе к турбулентности*. М., 1991.
36. Шредер М. *Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая*. Ижевск, 2001.

PHYSICAL AND CHEMICAL STRUCTURE ANALYSIS

Kheifetz M. L.^{1,2}, Dr. Tech. Sciences, Professor, Deputy Academician-Secretary, Chief Researcher,
Kolmakov A.G.³, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Tech. Sciences, Professor, Deputy Director
Klimenko S.A.⁴, Dr. Tech. Sciences, Professor, Deputy Director

¹ Presidium of the NAS of Belarus, Minsk

² GNPO "Center" of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

³ A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, Moscow

⁴ V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev

Abstract

Using the historic analysis concerning the evolution of ideas and substance composition descriptions corresponding to them, the development stages for physical and chemical foundations of material science have been revealed and state and perspectives for the developed nanostructured material science, relying on the comprehensive study of substance composition at different scale levels, have been identified. To study the non-equilibrium processes of synthesis and nanostructured materials use, there has been proposed to complement the fundamentals of the physical-chemical analysis, as that will enable to detect the transient structures and processes which could be described by non-integer values for emerging phases and degrees of freedom of the system.

Keywords: physical and chemical structural analysis, chemical substance disorder, nonequilibrium thermodynamics of processes, synergetic approach, multifractal parameters, nanostructured materials.

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАММА ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И
ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ Ti – Al**

*СИТНИКОВ А. А.¹, доктор техн. наук, профессор,
ГРАДОБОВЕВ А. В.², доктор техн. наук, профессор,
ЯКОВЛЕВ В. И.¹, канд. техн. наук, доцент,
ЛОГИНОВА М. В.¹, канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
СОБАЧКИН А. В.¹, канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
МЯСНИКОВ А. Ю.¹, студент,
ГРИБОВ Ю. Е.¹, студент*

Ситников А.А. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,

¹Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
е – mail: sitalan@mail.ru

Градобоев А.В. – 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
е – mail: gradoboev1@mail.ru

Аннотация

Проведено экспериментальное исследование структурно – фазового состояния соединения Ti_3Al , полученного высокотемпературным синтезом методом индукционного нагрева, до и после воздействия на него малых доз гамма – облучения. Для исследования фазовых и структурных параметров использовался метод рентгеновской дифрактометрии. Выявлено, что для соединения Ti_3Al малые дозы гамма – облучения служат стимулятором для формирования радиационно-индуцированного состояния. Полученное состояние является неравновесным, что подтверждается малыми размерами ОКР и наличием микродеформаций в кристаллической ячейки Ti_3Al .

Ключевые слова: гамма – облучение, титан, алюминий, рентгеновская дифрактометрия, структурное состояние, кристаллическая решетка.

Введение

В настоящее время все больший научный и практический интерес вызывают исследование взаимодействия гамма-излучения с металлическими материалами и сплавами, как способ воздействия на структурные характеристики, фазовые состояния и свойства вещества. Воздействие на вещество интенсивными потоками радиации, в частности, γ – квантами позволяет решать как фундаментальные проблемы, так и экспериментальные задачи по разработке новых материалов. Кроме того, использование радиационного воздействия является одним из перспективных направлений в области модификации структуры и, как следствие, создания новых материалов с улучшенными физико-механическими и химическими свойствами [1 – 3].

Одним из способов, который может быть использован для модификации материалов, в том числе порошковых, является воздействие на них ионизирующего излучения. В результате радиационного воздействия в структуре вещества могут происходить преобразования. Например, известно, что гамма-излучение снимает локальные механические напряжения в дефектной структуре, которые протекают за счет более высокой энергии частиц, существующие в твердом теле, приводя структуру вещества в равновесное состояние [4 – 7].

Экспериментально выявлено, что в облученных материалах может формироваться так называемое радиационно – инициированное состояние, являющееся неравновесным и сопровождающееся изменением структурных параметров, фазового состояния и свойств вещества. Исследования показали, что при таком состоянии вещества в структуре формируются нанокластеры, предположительно состоящие из тех же атомов, что и матрица, но имеющие другую кристаллическую симметрию [8 – 13]. Такое структурное состояние сопровождается изменением физических и механических свойств материалов, что является важным в радиационном модифицировании. С другой стороны, в зависимости от параметров облучения и исходного структурного состояния исследуемого вещества, в структуре могут происходить процессы (в частности, релаксация локальных механических напряжений), приводящие к ее упорядоченному состоянию [14, 15]. Изучение процесса и причин возникновения радиационно – индуцированных состояний может послужить основой в области формирования радиационно – модифицированных материалов. Поэтому экспериментальные исследования условий формирования особых структурных состояний материалов при воздействии на них гамма-излучением представляются весьма актуальными.

Объектам исследования в данной работе является состав Ti_3Al , поскольку алюминиды титана и сплавы на их основе находят широкое применение для конструкций и деталей, работающих в экстремальных условиях, и исследование явлений, возникающих при их взаимодействии с облучением, представляет существенный интерес [16 – 19]. Создание конструкционных материалов с улучшенными свойствами или оценка их пригодности к применению в специфических условиях являются сложными научными и инженерными задачами.

Интерметаллид Ti_3Al и сплавы на его основе являются перспективными высокопрочными материалами, которые могут применяться в ответственных конструкциях, в частности в авиационной (например, турбинные лопатки) и аэрокосмической технике [20, 21]. Ti_3Al имеет высокие механические свойства и среднюю термостойкость равную примерно $800^\circ C$ [22, 23].

Исходя из вышеизложенного, цель настоящей работы состоит в исследовании влияния малых доз γ – излучения на структурно – фазовые состояния состава Ti_3Al .

Экспериментальные исследования

При проведении экспериментальных исследований в качестве объекта использовался состав Ti_3Al (ГПУ – решетка) в виде порошка, полученный в механически активированной порошковой смеси при реализации высокотемпературного синтеза в условиях объемного воспламенения методом индукционного нагрева. Методика получения соединений Ti_3Al описана в работах [24 – 27].

Из порошкового материала готовились цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 5 мм путем прессования на стандартном оборудовании (лабораторном прессе), предназначенном для проведения исследований порошковых материалов. Нагрузка на прессе составляла 40 кН.

На следующем этапе проводилось облучение γ – квантами на сертифицированной стационарной установке «Исследователь» (изотоп ^{60}Co), при нормальных климатических условиях. Уровень воздействия γ – квантов характеризовали поглощенной дозой. Доза облучения составляла 2 кГр, время облучения 30 мин. Исследования фазового состава и структурных параметров проводились на дифрактометре рентгеновском общего назначения ДРОН – 6 с $CuK\alpha$ – излучением ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$). Рентгенограммы регистрировались при одинаковых условиях съемки, с шагом сканирования 0.05 градуса и временем экспозиции 3 с. Для сравнения интенсивностей на дифрактограммах за максимальную интенсивность была взята $I_{max} = 220$ усл. ед., интенсивность остальных отражений оценивалась в долях от нее. Обработку и анализ экспериментальных данных осуществляли с помощью пакета программ PDWin. Для расчета параметров тонкой структуры использовалась программа Size&Strain пакета PDWin, с поправками на приборное уширение. Уточнение параметров элементарной ячейки проводилось по стандартному методу наименьших квадратов. Исследования микроструктуры образ-

цов проводилось на исследовательском оптическом микроскопе Axio Observer Z1M фирмы Carl Zeiss. Приготовление шлифов осуществлялось по стандартной методике.

Результаты и обсуждения

На рис. 1 представлены дифрактограммы соединения Ti_3Al до и после γ – облучения.

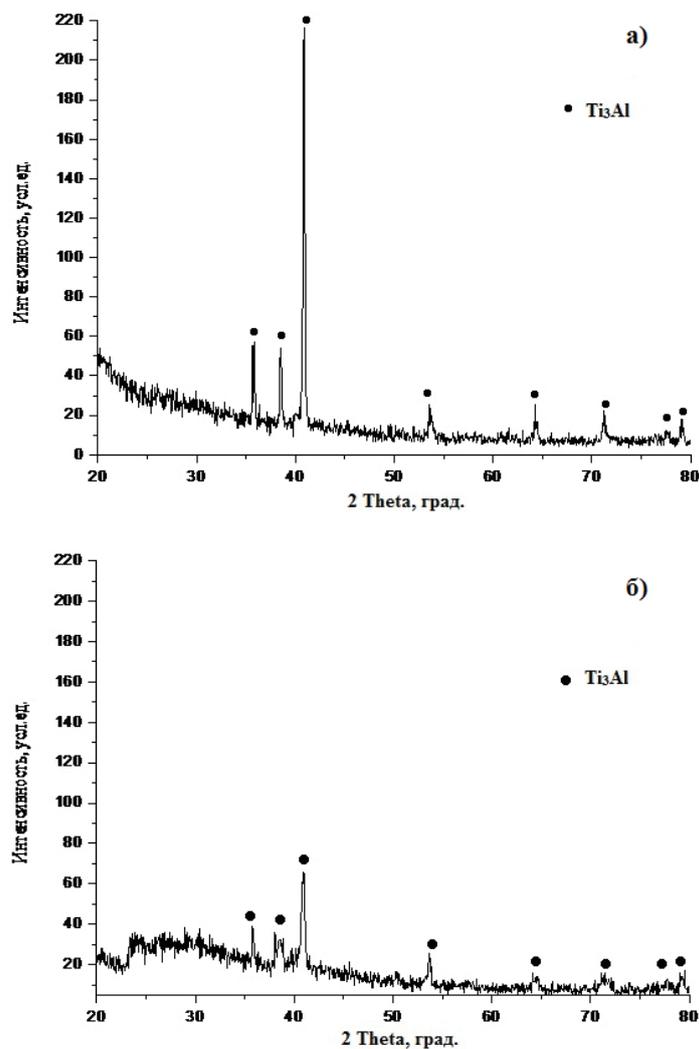


Рис. 1. Дифрактограммы соединения Ti_3Al :
а) до γ – облучения; б) после γ – облучения

Согласно дифракционным исследованиям набор межплоскостных расстояний образца исходного соединения Ti_3Al соответствовал эталонным данным для фазы Ti_3Al (табл.1), которые брались по «Card (9 – 98) Базы данных порошковой дифрактометрии. Версия 3.0».

Таблица 1

Межплоскостные расстояния фазы Ti₃Al

| HKL | d, Å | |
|-------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| | Исходный образец Ti ₃ Al | Табличное значение Ti ₃ Al |
| (200) | 2.5 | 2.5 |
| (002) | 2.34 | 2.32 |
| (201) | 2.208 | 2.205 |
| (202) | 1.7 | 1.7 |
| (220) | 1.44 | 1.443 |
| (203) | 1.32 | 1.315 |

Из сравнительного анализа дифрактограмм следует, что после воздействия малых доз гамма-облучения происходят существенные дифракционные изменения, характеризующиеся увеличением диффузного фона и значительным уменьшением интенсивности отражений фазы, так I_{\max} обл.(200) = 65.7 усл. ед. относительно необлученного I_{\max} исх.(200) = 216.7 усл. ед. Отмеченное уменьшение интенсивности интерференционных линий может возникать при частичном искажении кристаллической решетки Ti₃Al, в частности, в результате смещения атомов из идеальных положений [28].

Также наблюдается уширение дифракционных линий с их раздвоением, которое является характерным при формировании радиационно-индуцированного состояния, имеющего нанокластерную морфологию [29, 30].

На рис. 2 представлены характерные изменения дифракционных линий Ti₃Al для плоскостей (002) и (201).

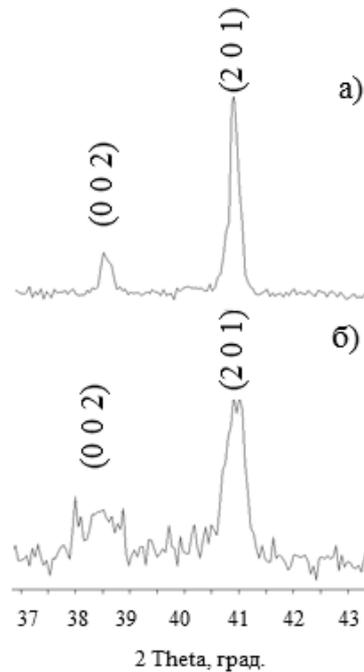


Рис. 2. Дифракционные линии (002) и (201) соединения Ti₃Al:
а) исходная, б) после γ – облучения

Как видно на примере дифракционных линий (002) и (201), после облучения формы рентгеновских дифракционных отражений Ti_3Al оказываются раздвоенными со значительным угловым смещением. Образовавшееся структурное состояние материала является неравновесным. Следует отметить, что при таком радиационно – индуцированном состоянии вещества в его кристаллической решетке происходит изменение межатомного расстояния и могут образовываться кластеры с симметрией, отличной от симметрии матрицы. В табл. 2 приведены структурные параметры исходного соединения Ti_3Al и после γ – облучения. Эталонные данные для Ti_3Al брались по J. Met., Enc, Margolin., 9, 484, 1957 (База данных порошковой дифрактометрии PDWin 3).

Таблица 2

Структурные параметры и объем кристаллической решетки Ti_3Al до и после γ – облучения

| Параметры ячейки | Ti_3Al | | Эталон Ti_3Al Sys: Hexagonal |
|----------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| | до γ -облучения | после γ -облучения | |
| a, (Å) | 5.789 | 5.790 | 5.775 |
| c, (Å) | 4.679 | 4.723 | 4.638 |
| V, (Å ³) | 135.859 | 137.163 | 133.96 |

Разупорядочение кристаллической решетки Ti_3Al после гамма – облучения подтверждается увеличением структурных параметров решетки и ее объема относительно исходного образца и эталона. До облучения исходный порошок Ti_3Al имел однородную крупнодисперсную структуру, с величиной ОКР более 2000 Å, без наличия микродеформации [31]. После применимой дозы γ – облучения размеры блоков когерентного рассеяния уменьшаются до $D=296.88 \text{ Å}$, а величина микродеформаций составляет $\langle \varepsilon^2 \rangle = 4.199499 \cdot 10^{-6}$.

В представленных на рис. 3 микроструктурах соединения Ti_3Al (до и после воздействия гамма – облучения соответственно) видимых отличий не наблюдается. После воздействия гамма – облучения фазовый состав не меняется. Микроструктура Ti_3Al имеет кристаллический каркас, большую площадь шлифа занимают крупные кристаллы фазы на фоне темных включений, предположительно пор.

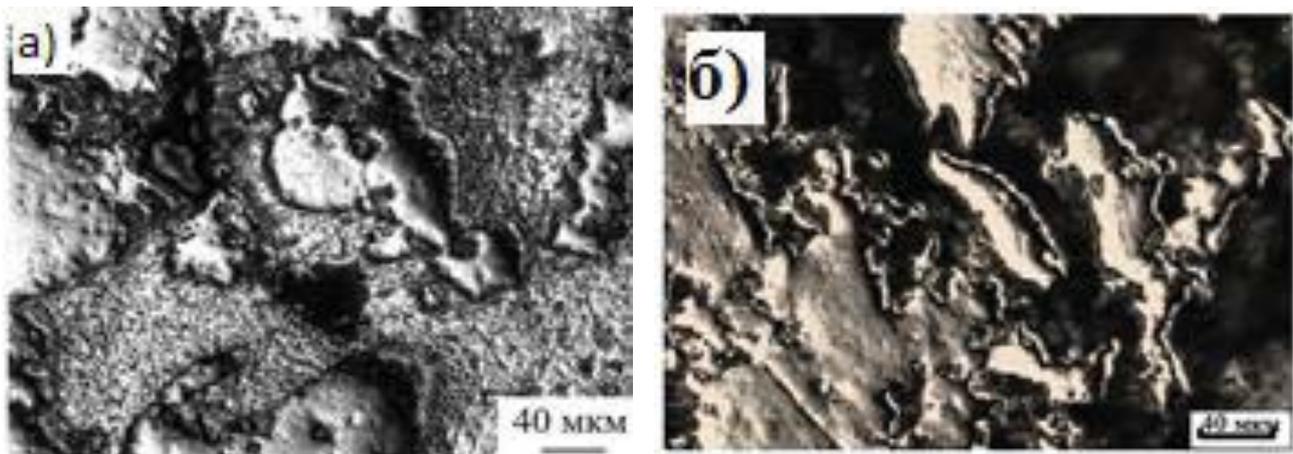


Рис. 3. Микроструктуры соединения Ti_3Al : а) до γ – облучения, б) после γ – облучения

В Ti_3Al при воздействии малых доз γ – облучения структура соединения переходит в неравновесное состояние, начинает развиваться особое радиационно-индуцированное состояние, что подтверждается видом дифракционных рефлексов (уширение и раздвоение пиков), характерного для данного состояния и видом микроструктуры (рис. 3).

Работа проводилась в рамках государственного Задания № 11.1085.2017/ПЧ на НИОКР в 2017 году Министерства образования и науки РФ по теме «Фундаментальные основы синтеза механоактивированных материалов с аморфной, нанокристаллической, интерметаллидной структурой под воздействием концентрированных источников энергии».

Выводы

1. Обнаружено формирование особого радиационно-индуцированного состояния соединения Ti_3Al после воздействия на него дозы γ – облучения 2 кГр, идентифицированного по расщеплению дифракционных рентгеновских максимумов.
2. Образовавшееся структурное состояние материала является неравновесным, что подтверждается значительным уменьшением ОКР, наличием микродеформаций в кристаллической решетке Ti_3Al и увеличением ее объема.

Список литературы

1. Паршин А.М., Криворук М.И., Звягин В.Б. Диффузия и радиационные дефекты в сплавах // Сб. науч. тр. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2005. С. 271 – 275.
2. Хмелевская В.С., Богданов Н.Ю., Горчаков К.А. Наноструктурирование металлических материалов интенсивными ионными пучками // Физика и химия обработки материалов. 2008. №5. С. 5 – 11.
3. Звягин В.Б. Некоторые аспекты физических условий работы конструкционных материалов основных узлов ядерных и термоядерных №2. С. 14 – 18.
4. Градобоев А.В., суржиков А.П. Радиационная стойкость СВЧ приборов на основе арсенида галлия. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2005. – 277 с.
5. Мамонтов А.П., Чернов И.П. Эффект малых доз ионизирующего излучения. –2 –е изд., перераб. И доп. – Томск: Дельтапдан, 2009. – 288 с.
6. Э.П. Шевякова, Е.В. Лифшиц, Е.П. Березняк. Влияние электронного облучения на структурно-фазовые изменения слоистых силикатов // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». 1994, в. 1(61), с. 70 – 73.
7. В.П. Иваницкий, П.О. Вознюк, С.Д. Спивак, А.Н. Пономаренко. Оптические свойства кальциевых амфиболов как показатель радиационной устойчивости их структуры: Збірник наукових праць, Інститут геохімії навколишнього середовища. Київ, 2001, в. 3/4, с. 251 – 259.
8. Nicholson M., Barabash R.I., Zschack P., Ice G.E. Diffuse X-ray scattering measurements of point defects and clusters in iron // J. Nucl. Mater. 2007. V. 367-370. P. 269 – 275.
9. Gray D.L., Cummings W.V. An X-ray diffraction study of irradiated molybdenum // Acta Met. 1960. V. 8. P. 446 – 451.
10. Косенков В.М. Рентгенография в реакторном материаловедении. М.: "Энергоатомиздат", 1985. 304 с.
11. Кацнельсон А.А., Гончаренко Ю.Д., Грабова Р.Б., Косенков В.М. Рентгеновские исследования облученных нейтронами металлов // Физика металлов и металловедение. 1984. Т. 57. С. 138 – 141.
12. Sudhakar C., Rao V., Kuriasose J. Influence of Irradiation on the Catalytic Properties of zinc oxide // Radiat. Phys. Chem. 1982. Vol. 19 (2). P. 101 – 105.
13. Градобоев А.В., Суржиков А.А. Радиационная стойкость СВЧ приборов на основе арсенида галлия. Томск: Изд-во ТПУ, 2005. 277 с.

14. Мамонтов А.П., Чернов И.П. Эффект малых доз ионизирующего излучения. Томск: Дельтаплан, 2009. 288 с.
15. Bartolotta P.A., Krause D.L. Proc. The Second Int. Symp. "Gamma Titanium Aluminides". TMS. San Diego, California, 1999. P. 3.
16. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. 520 с.
17. Appel F., Heaton-Paul J. D., Oehring M. Gamma Titanium Aluminide Alloys. 2011. P. 739.
18. Boyer R., Welsch G., Collings E.W. Materials Properties Handbook. Titanium Alloys / ASM International. The Material Information Society. 1994. P. 1176.
19. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. – М.: ВИЛС – МАТИ, 2009. – 520с.
20. Appel F., Heaton-Paul J. D., Oehring M. // Gamma Titanium Aluminide Alloys. Science and Technology / Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011. – 739pp.
21. Ракоч А.Г., Жукарева О.В., Фукалова Е.В., Ковалев А.Ф. О механизме влияния фторидов на процесс окисления циркония и его сплава с ниобием на воздухе в широком диапазоне температур // Цветная металлургия. 1996. № 6. С. 56 – 59.
22. Ракоч А.Г., Шкуро В.Г., Замалин Е.Ю., Жукарева О.В., Фукалова Е.В. Процесс высокотемпературного окисления материалов в присутствии активаторов и пассиваторов // Физика и химия обработки материалов. 1996. № 3. С. 113.
23. Filimonov V.Yu., Sitnikov A.A., Afanas'ev A.V., Loginova M.V., Yakovlev V.I., Negodyaev A.Z., Schreifer D.V., Solov'ev V.A. Microwave Assisted Combustion Synthesis in Mechanically Activated 3Ti + Al Powder Mixtures: Structure Formation Issues // International Journal of Self Propagating High Temperature Synthesis. 2014. Vol. 23. №. 1. P. 18 – 25.
24. Loginova M.V., Filimonov V.Yu., Yakovlev V.I., Sytnikov A.A., Negodyaev A.Z., Shreifer D.V. Analysis of the Influence of High Temperature Synthesis Parameters on the Structure Formation in the Mechanically Activated 3Ti+Al Powder Mixture // Applied Mechanics and Materials, 2015. Vol. 788. P. 117 – 122.
25. Filimonov V.Yu., Sytnikov A.A., Yakovlev V.I., Loginova M.V., Afanasyev A.V., Negodyaev A.Z. The Features of Structure Formation in Mechanically Activated Powder Mixture 3Ti+Al in the Thermal Explosion Mode // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 621. P. 71 – 76.
26. Popova A.A., Sobachkin A.V., Nazarov I.V., Yakovlev V.I., Loginova M.V., Sitnikov A.A., Sharafutdinov M.R., Lyakhov N.Z. Dynamic Diffractometry of Phase Transformations during High Temperature Synthesis in Mechanically Activated Powder Systems in the Thermal Explosion Mode // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2013. Vol. 77. №. 2. P. 120 – 122.
27. Дикий Н.П., Довбня А.Н., Медведева Е.П., Федорец И.Д., Хлапова Н.П., Ляшко Ю.В., Медведев Д.В. Фотолюминисценсные и каталитические свойства гамма-активированных наночастиц ZnO // Journal of Kharkiv National University. 2013. Vol. 1059. P.83 – 90.
28. Конобеевский С.Т., Бутра Ф.П. Рентенографические эффекты в облученных нейтронами кристаллах // Действие ядерных излучений на материалы. 1962. С. 251 – 256.
29. Хмелевская В.С., Кордо М.Н. Радиационно-индуцированные фазово-структурные превращения в сплавах систем V-Ti-Cr и V-Fe // Вопросы атомной науки и техники. Материаловедение и новые материалы. 2008. Т. 72. № 3. С. 151 – 156.
30. Li D., Haneda H. Morphologies of zinc oxide particles and their effects on photocatalysis // Chemospera. 2003. Vol.51. P. 129 – 137.
31. Пат. 2557924 Рос. Федерация: МПК А61L 27/06, А61L 27/32, А61К 6/033, А61F 2/02; патентообладатель Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. - № 2014114085/15; заявл. 09.04.2014; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 21. «Способ получения монофазного интерметаллидного сплава на основе системы алюминий - титан» Ситников А.А., Логинова М.В.,

Яковлев В.И., Филимонов В.Ю., Афанасьев А.В., Негодяев А.З., Соловьев В.В., Шрейфер Д.В., Корчагин М.

IMPACT OF GAMMA IRRADIATION ON THE STRUCTURE AND PHASE STATE OF THE SYSTEM Ti – Al

Sitnikov A. A.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: sitalan@mail.ru

Gradoboev A. V.², D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: gradoboev1@mail.ru

Yakovlev V. I.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e – mail: anicpt@rambler.ru

Loginova M. V.¹, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, e – mail: logi_m@mail.ru

Sobachkin A. V.¹, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher, e – mail: sobalvi@yandex.ru

Miasnickov A. Yu.¹, student

Gribov Yu. E.¹, student

¹Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul 656038, Russian Federation

²National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenina avenue, Tomsk 634050, Russia Federation

Abstract

Currently, scientific and practical interest is caused by the researches of the interaction of gamma radiation with metallic materials and alloys.

The objects of research in this paper are the composition of Ti₃Al because the titanium aluminides and alloys based on them are widely used for constructions and details, operating in extreme conditions.

The purpose of this paper was to investigate the effect of small doses of γ – radiation on the structure-phase states of Ti₃Al.

During the work was made an experimental study of the structural – phase state of a powder mechanically activated Ti₃Al mixture at the realization of high-temperature synthesis by induction heating, before and after exposure to it of small doses of gamma irradiation. For research the phase and structural parameters was used the X – ray diffractometry method.

It was revealed the formation of a special radiation-induced state of the Ti₃Al compound after exposure by the dose of γ – irradiation of 2 kGy, identified by splitting X-ray diffraction maxima.

The resulting structural state of the material is nonequilibrium, which is confirmed by a significant decreasing coherent scattering region, by the presence of microdeformations in the crystal lattice of Ti₃Al and by increasing its volume.

Keywords: Gamma-irradiation, titanium, aluminum, X – ray diffractometry, structural state, crystal lattice.

УДК 621.791.72

**МИКРОТВЕРДОСТЬ СОСТАВЛЯЮЩИХ В ДВУХСЛОЙНОМ
МУЛЬТИМОДАЛЬНОМ ПОКРЫТИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ
РЕЖИМАХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ**

*ДЕВОЙНО О. Г., доктор техн. наук, профессор,
ЛУЦКО Н. И., научный сотрудник,
ЛАПКОВСКИЙ А. С., научный сотрудник
(БНТУ, г Минск, Республика Беларусь)*

Девойно О.Г. – 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65,
Белорусский национальный технический университет,
e – mail: scvdmed@bntu.by

Аннотация

В статье обсуждается возможность нанесения мультимодальных покрытий из разнородных металлических материалов методом лазерной наплавки. Мультимодальные покрытия наносились методом лазерной наплавки путем чередования валиков из самофлюсующегося сплава на основе никеля и алюминиевой бронзы. Изучалось распределение микротвердости в поперечном сечении таких покрытий. Установлено, что в мультимодальных покрытиях на основе никелевого сплава и алюминиевой бронзы наблюдается периодическое изменение микротвердости в поперечном сечении в направлении параллельно основе. Показано влияние режимов лазерной наплавки на микротвердость фаз мультимодального покрытия.

Ключевые слова: лазерная наплавка, мультимодальные покрытия, распределение микротвердости, периодичность микротвердости, режимы лазерной наплавки.

Введение

Роль композиционных материалов для современной промышленности трудно переоценить. Именно с их помощью удастся значительно повысить износостойкость и получить высокие физико-механические свойства. Все сказанное в полном объеме относится и к композиционным покрытиям. Наибольший интерес, в плане повышения физико-механических свойств, представляют так называемые мультимодальные покрытия [1, 2]. Под модой понимается значение какого-либо признака (размера частиц упрочняющей фазы, пористости, вида материала), которые встречаются наиболее часто. Если имеются несколько значений какого либо признака, имеющие одинаковую частоту повторения, то покрытие считается мультимодальным (бимодальным). Метод лазерной наплавки дает возможность наносить валики небольших размеров, поперечное сечение которых сравнимо с размером лазерного пятна на поверхности обработки. Поэтому он позволяет создавать мультимодальные покрытия, которые могут наноситься в один, два, и более слоев. При этом существует реальная возможность заранее спроектировать расположение фаз из различных материалов в таком покрытии. Нанесение мультимодальных покрытий требует использования координатных систем с числовым программным управлением для осуществления укладки наплавочных валиков в определенном порядке с достаточной точностью.

Материалы, методики, оборудование

В данной работе исследуется распределение микротвердости в двухслойном мультимодальном покрытии, нанесенном послойно с чередованием валиков из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ – 12Н – 01 с валиками из бронзы ПГ – 19М – 01 в каждом слое. Химический состав исходных порошков приведен в таблице.

Химический состав наплавлявшихся материалов

| Марка | Содержание компонентов, % (по массе) | | | | | | | | | |
|-----------|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|----|--------|---|----------|
| | Cr | B | Si | Fe | C | Ni | Co | Cu | W | Al |
| ПГ-12Н-01 | 8-14 | 1,7-2,5 | 1,2-3,2 | 1,2-3,2 | 0,3-0,6 | Основа | - | - | - | - |
| ПГ-19М-01 | - | - | - | До 4 | - | - | - | Основа | - | 8,5-10,5 |

Покрытия наносились на технологическом комплексе на базе CO₂ лазера непрерывного действия типа «Комета 2» и координатного стола с системой числового программного управления «Mach 3». Наплавка велась в четыре этапа. На первом этапе на основу наносилась сетка из параллельных валиков из сплава ПГ – 12Н – 01 с различными шагами, на втором этапе между валиками из сплава ПГ – 12Н – 01 наплавлялись валики из бронзы ПГ – 19М – 01. Далее снова выполнялись этапы 1 и 2, основой для наплавки являлся уже нанесенный слой, только наплавка валиков второго слоя производилась со смещением, так, чтобы валики из сплава ПГ-12Н-01 располагались над валиками из бронзы ПГ – 19М – 01, и наоборот. Схема поперечного сечения такого покрытия показана на рис. 1.

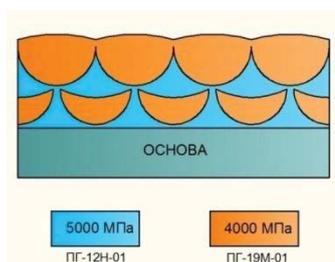


Рис. 1. Схема поперечного сечения двухслойного мультимодального покрытия из сплава ПГ – 12Н – 01 и бронзы ПГ – 19М – 01



Рис. 2. Поперечное сечение двухслойного мультимодального покрытия x50

Как видно из рис.1, двухслойное мультимодальное покрытие представляет собой матрицу из сплава ПГ – 12Н – 01 со средней микротвердостью 5000 Мпа, в которую при помощи лазерной наплавки внедрены области бронзы ПГ – 19М – 01 со средней микротвердостью 4000 Мпа. Фазы самофлюсующегося сплава и бронзы в поперечном сечении расположены в шахматном порядке. После механической обработки в плане сверху такое покрытие будет представлять собой полосчатое покрытие, в котором чередуются полосы из сплава ПГ – 12Н – 01 и бронзы ПГ – 19М – 01. Фотография шлифа поперечного сечения такого покрытия приведена на рис. 2. Отчетливо видны валики бронзы ПГ – 19М – 01 и валики из сплава ПГ – 12Н – 01.

Измерения микротвердости выполнялись на микротвердомере ПМТ – 3 при нагрузке 100 г по глубине покрытия по линиям симметрии валиков из сплава ПГ – 12Н – 01 и бронзы ПГ – 19М – 01,

находящимся в первом слое покрытия, из основы в покрытие с шагом 0,05 мм, и в продольном направлении вдоль поперечного сечения слоя параллельно основе с шагом 0,1 мм.

Результаты и обсуждение

Типичная картина распределения микротвердости по глубине двухслойного мультимодального покрытия из сплава ПГ – 12Н – 01 и бронзы ПГ – 19М – 01 представлена на рис. 3.

Как видно из рис. 3, в случае, когда внизу находится валик бронзы, на границе основа-покрытие наблюдается достаточно резкий рост микротвердости до значений 4300 – 4800 Мпа, что соответствует бронзовой составляющей мультимодального покрытия. На таком уровне микротвердость остается до расстояния от основы 0,55 мм, когда при переходе к фазе самофлюсующегося сплава микротвердость вновь возрастает до 5200 – 5800 Мпа и сохраняется на таком уровне до расстояния от основы 0,9 мм. После этого при переходе к стыку двух валиков бронзы над серединой валика из сплава ПГ – 12Н – 01 происходит снижение микротвердости покрытия до 4500 – 4800 Мпа. Таким образом для случая, когда внизу находится валик бронзы, по глубине двухслойного мультимодального покрытия наблюдается три зоны микротвердости. При переходе от одной зоны микротвердости к другой, изменение микротвердости происходит достаточно резко, что свидетельствует о небольших величинах переходных зон.

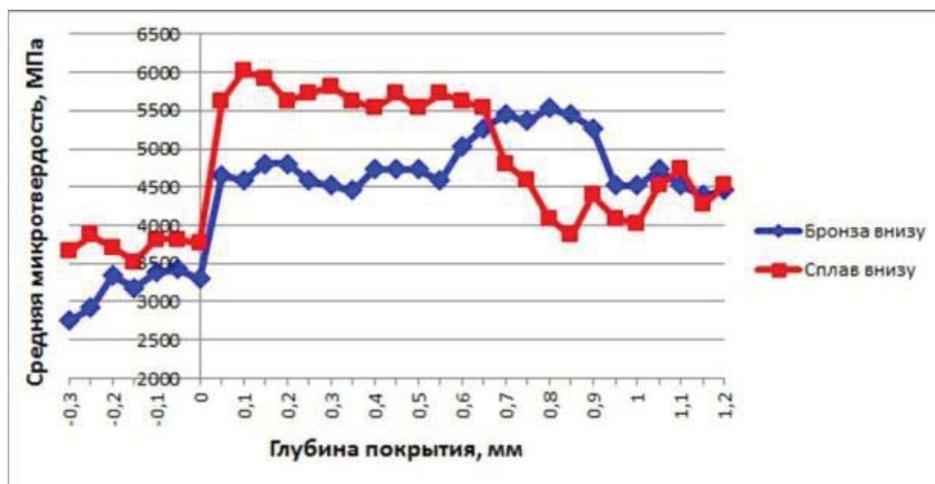


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине двухслойного мультимодального покрытия из сплава ПГ – 12Н – 01 и бронзы ПГ – 19М – 01

Когда внизу находится валик из сплава ПГ – 12Н – 01, видно, что на границе основа-покрытие происходит резкий рост микротвердости до значений 5000 – 5800 Мпа, что соответствует сплаву ПГ – 12Н – 01. На таком уровне микротвердость сохраняется до расстояния от основы 0,65 мм. После этого происходит снижение микротвердости покрытия до 4200 – 4700 Мпа, что связано с переходом в бронзовую составляющую мультимодального покрытия. Таким образом, для случая, когда внизу находится самофлюсующийся сплав, по глубине двухслойного мультимодального покрытия наблюдаются две зоны микротвердости. Величина переходных зон, как и в предыдущем случае небольшая.

Характерные результаты измерения микротвердости в продольном направлении вдоль поперечного сечения слоя параллельно основе представлены на рис. 4. Координаты начальной точки измерения выбирались примерно в середине левого валика из бронзы ПГ – 19М – 01, координаты конечной точки измерения – примерно в середине правого валика из бронзы.

Из рис. 4 видно, что при всех исследованных шагах наплавки в продольном направлении двухслойного мультимодального покрытия наблюдается периодичность изменения микротвердости. Вначале, когда измерения выполняются в валике бронзы ПГ – 19М – 01, средняя микротвердость покрытия находится в пределах 3300 – 4750 Мпа, затем, при переходе в валик из сплава ПГ – 12Н – 01, наблюдается увеличение микротвердости до 4400 – 5600 Мпа. И, наконец, когда измерения снова проводятся в валике из бронзы, средняя микротвердость опять уменьшается до 3300 – 4750 Мпа. Такие периодические изменения микротвердости происходят вдоль всего поперечного сечения двухслойного мультимодального покрытия из сплава ПГ – 12Н – 01 и бронзы ПГ – 19М – 01.

Другими словами, при помощи лазерной наплавки существует возможность создавать мультимодальные полосчатые покрытия, состоящие из полос разнородных материалов и при этом добиваться периодичности изменения микротвердости покрытий в поперечном сечении, по глубине покрытия и в плане сверху. Варьируя соотношение шагов наплавки одноименных/разноименных валков можно добиваться разной периодичности изменения этой характеристики покрытий.

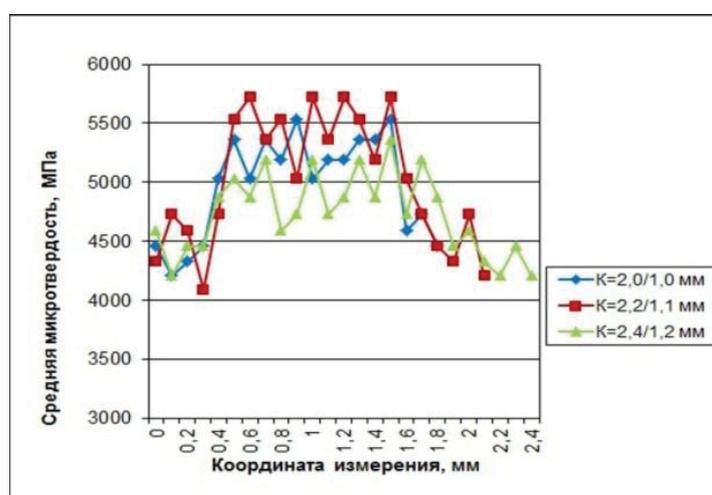


Рис. 4. Распределение микротвердости в двухслойном Мультимодальном покрытии из сплава ПГ – 12Н – 01 и бронзы ПГ – 19М – 01 в направлении параллельно основе

Для определения влияния режимов лазерной наплавки на микротвердость фаз в двухслойном мультимодальном покрытии были построены зависимости средней микротвердости фазы сплава ПГ – 12Н – 01 и фазы бронзы ПГ – 19М – 01 от скорости наплавки и шага наплавки (рис. 5 – 8).

Как видно из рис. 5, средняя микротвердость фазы сплава ПГ – 12Н – 01 в двухслойном мультимодальном покрытии при увеличении скорости наплавки вначале уменьшается, а затем несколько увеличивается. Такая зависимость объясняется тем, что с увеличением скорости наплавки уменьшается энергозатрат в покрытие. При скорости наплавки 1,7 мм/с энергозатрат в покрытие достаточен для образования сравнительно большой ванны расплава, в то же время, скорость отвердевания такова, что позволяет получить зернистость покрытия, обеспечивающую повышенную микротвердость. При увеличении скорости наплавки до 2 мм/с энергозатрат в покрытие уменьшается. При этом уменьшается размер ванны расплава и увеличивается скорость отвердевания при одном и том же количестве подаваемого порошка. Все большую роль начинает играть неполное сплавление материала валков по границам зерен, которое приводит к уменьшению средней микротвердости фазы сплава ПГ – 12Н – 01 в мультимодальном покрытии. С увеличением скорости наплавки до 2,3 мм/с средняя микротвердость фазы сплава ПГ – 12Н – 01 несколько увеличивается. Последнее происходит вероят-

нее всего из-за увеличения скорости отвердевания до того уровня, когда в покрытии в большом количестве фиксируются высокотемпературные соединения, имеющие высокую микротвердость.

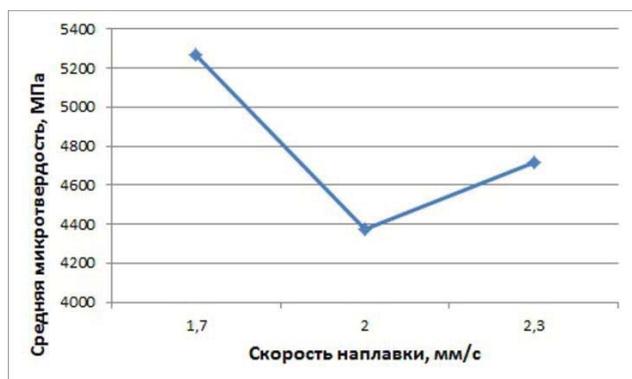


Рис. 5. Зависимость средней микротвердости фазы сплава ПГ – 12Н – 01 в двухслойном мультимодальном покрытии от скорости наплавки

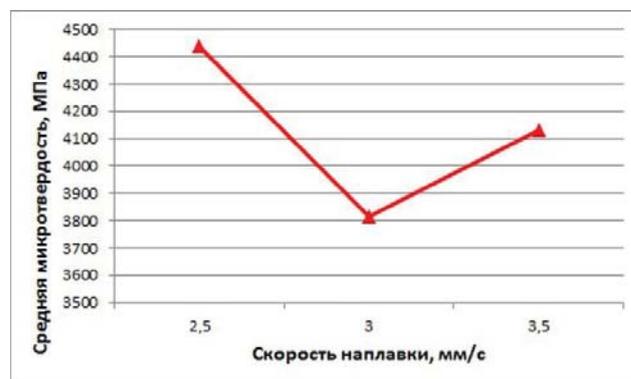


Рис. 6. Зависимость средней микротвердости фазы бронзы ПГ – 19М – 01 в двухслойном мультимодальном покрытии от скорости наплавки

Зависимость средней микротвердости фазы бронзы ПГ – 19М – 01 в мультимодальном покрытии от скорости наплавки представлена на рис. 6. Видно, что характер зависимости средней микротвердости фазы бронзы от скорости наплавки в двухслойном мультимодальном покрытии идентичен зависимости, приведенной на рис. 5 для фазы сплава ПГ – 12Н – 01. Можно предположить, что такой характер зависимости объясняется теми же причинами, которые рассмотрены выше для фазы сплава ПГ – 12Н – 01.

На рис. 7 показана зависимость средней микротвердости фазы сплава ПГ – 12Н – 01 в двухслойном мультимодальном покрытии от шага наплавки. Из рис. 7 ясно, что при шагах наплавки одноименных/разноименных валиков 2,0/1,0 мм и 2,2/1,1 мм наблюдается практически одинаковая максимальная микротвердость. При этих шагах наплавки за счет хороших условий нагрева-охлаждения при наплавке соседних валиков в покрытии создаются условия для формирования оптимальной зернистости структуры и хорошего сплавления материала покрытия по границам зерен, что и обеспечивает повышенную величину средней микротвердости. Увеличение шага наплавки до 2,4/1,2 мм приводит к тому, что повторные нагревы при наплавке соседних валиков происходят реже. Имеет место уменьшение энергозатрат в покрытие. В этом случае начинает сказываться неполное сплавление материала покрытия по границам зерен, вызывающее уменьшение средней микротвердости фазы сплава ПГ – 12Н – 01.

Рис. 8 показывает зависимость средней микротвердости фазы бронзы в двухслойном мультимодальном покрытии от шага наплавки. Как и для фазы сплава ПГ – 12Н – 01 при шагах наплавки одноименных/разноименных валиков 2,0/1,0 мм и 2,2/1,1 мм наблюдается практически одинаковая повышенная микротвердость. При увеличении шага наплавки до 2,4/1,2 мм средняя микротвердость фазы бронзы ПГ – 19М – 01 уменьшается. Причины такой зависимости средней микротвердости фазы бронзы от шага наплавки объясняются теми же факторами, которые рассмотрены выше для фазы сплава ПГ – 12Н – 01.

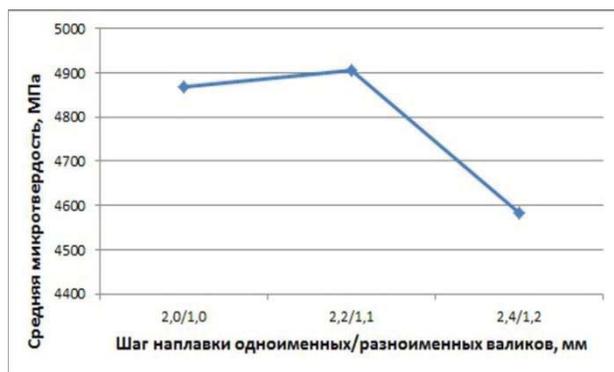


Рис. 7. Зависимость средней микротвердости фазы сплава ПГ – 12Н – 01 в двухслойном мультимодальном покрытии от шага наплавки

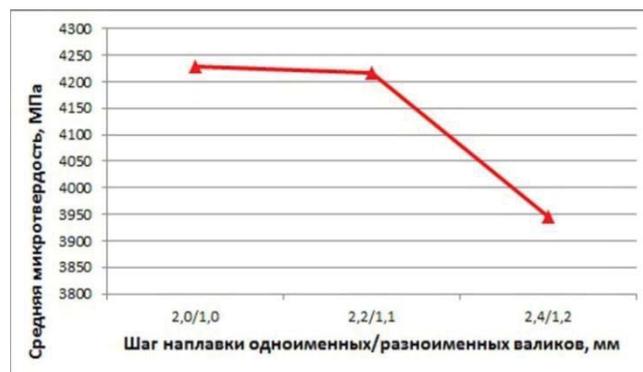


Рис. 8. Зависимость средней микротвердости фазы бронзы ПГ – 19М – 01 в двухслойном мультимодальном покрытии от шага наплавки

Выводы

Исследования, проведенные в рамках данной работы, позволяют понять механизм формирования двухслойных мультимодальных покрытий из разнородных материалов методом лазерной наплавки. Показана возможность получения периодических изменений микротвердости в поперечном сечении мультимодальных покрытий, в направлении параллельно основе, по глубине покрытия и в плане сверху. Полученные результаты позволяют сделать предположение о периодичности изменения и других физико-механических свойств таких покрытий. Кроме того, можно с достаточной степенью уверенности утверждать, что существует реальная возможность регулирования физико – механических и эксплуатационных свойств, в том числе износостойкости и коэффициента трения в мультимодальных покрытиях, получаемых методом лазерной наплавки.

Изучено также влияние режимов лазерной наплавки на микротвердость фаз мультимодального покрытия из сплава ПГ – 12Н – 01 и бронзы ПГ – 19М – 01. Увеличение скорости лазерной наплавки приводит вначале к уменьшению средней микротвердости, а затем к некоторому ее росту. Эта закономерность выполняется как для фазы сплава ПГ – 12Н – 01, так и для фазы бронзы ПГ – 19М – 01. В зависимостях средней микротвердости от шага наплавки для обеих фаз имеется диапазон шагов (2,0/1,0 мм – 2,2/1,1 мм), когда величина средней микротвердости практически не изменяется. При дальнейшем увеличении шага наплавки средняя микротвердость фаз мультимодального покрытия уменьшается.

Разработанные мультимодальные покрытия могут найти применение для повышения износостойкости деталей работающих в условиях трения с ограниченной смазкой и сухого трения.

Список литературы

- 1 J. Ratajski, A. Gilewicz, P. Bartosik, L. Szparaga. – Mechanical properties of antiwear Cr/CrN multimodule coatings // Archives of Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 75. - I. 2. – P. 35-45.
- 2 A. Gilewicz, R. Olik, L. Szpraga, J. Ratajski. – The properties of multi-module and gradient coatings base on CrN/CrCN deposited on nitride 4140 steel // Problemy Eksploatacji – Maintenance Problems. – 2014. – I. 3. – P. 27 – 43.

**PHASES MICROHARDNESS IN TWO – LAYER MULTIMODAL COATING
AT DIFFERENT PROCESSING PARAMETERS OF LASER CLADDING**

Devoino O.G., D.Sc.(Engineering), Professor, e – mail: scvdmed@bntu.by

Lutsko N.I., Research scientist, e – mail: nilucko@tut.by

Lapkovskii A.S., Research scientist, e – mail: alapkovskii@gmail.com

Belarusian National Technical University, 65 Prospect Nezavisimosti, Minsk, 220013, Republic of Belarus

Abstract

The paper discusses the depositing possibility of multimodal coatings of dissimilar metallic materials by laser cladding. Multimodal coatings deposited by laser cladding by alternating tracks of self-fluxing nickel based alloy and aluminum bronze. Micro-hardness distribution studied in the cross section of these coatings. It is found the periodic variation of micro-hardness in cross section of multimodal coatings from nickel based alloy and aluminum bronze in the parallel to base direction. Micro-hardness periodically varies from 5000 MPa to 4000 MPa. Such variations in micro-hardness associated both with nickel based phases and aluminum bronze phases. It was also found the effect of laser cladding processing parameters on multimodal coating phases micro-hardness.

Keywords: laser cladding, multimodal coatings, micro-hardness distribution, micro-hardness periodicity, laser cladding processing parameters.

УДК. 621.01 + 621.9.011

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ПОВЫШАЮЩЕЙ КАЧЕСТВО ВАЛОВ МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ**

*ЗАЙДЕС С. А. доктор техн. наук, профессор,
ГОРБУНОВ А. В. канд. техн. наук
(ИРНИТУ, г. Иркутск, Россия,
ИркутскНИИХиммаш, г. Иркутск, Россия)*

Зайдес С.А. – 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
е – mail: zsa@istu.edu

Аннотация

Глубина упрочнения и остаточные напряжения в поверхностном слое оказывают существенное влияние на геометрическую стабильность мало жестких валов. Основная задача упрочнения рассматривается как обеспечение однородности напряженного состояния в объеме тела. Разработана новая конструкция обкатника центробежного типа для эффективного упрочнения мало жестких валов. Представлены расчетные зависимости для формирования рациональной глубины упрочненного слоя. Изложены результаты экспериментальных исследований по определению глубины упрочнения в зависимости от частоты вращения центробежного обкатника.

Ключевые слова: мало жесткий вал, центробежный обкатник, зона взаимного влияния, глубина упрочнения, микротвердость, шероховатость.

Введение

Обработка деталей малой жесткости типа валов и осей вызывает обычно технологические проблемы, так как показатели качества детали и производительность процесса вступают в противоречие. При существующих схемах обработки длинные и тонкие детали вращаются относительно оси, а рабочий инструмент создает радиальную нагрузку при продольном перемещении вдоль оси детали. Центробежные силы, возникающие при такой кинематике процесса, вызывают искривление заготовки, которая препятствует получению стабильных диаметральных размеров по длине. При снижении частоты вращения детали снижаются радиальные нагрузки, но резко повышается продолжительность времени на обработку таких деталей.

Вторая проблема связана с геометрической стабильностью длинномерных деталей. Напряженное состояние материала, которое формируется в процессе обработки, неравномерно распределяется по длине детали. В процессе обработки, сборки, эксплуатации и даже просто при хранении таких деталей происходит релаксация остаточных напряжений, которая приводит к искажению и (или) искривлению детали. И чем выше неравномерность напряженно-деформированного состояния в объеме тела, тем большую степень искажения претерпевают детали.

Во многих случаях заключительным этапом механической обработки является отделочно – упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД). Эффективность процессов ППД обоснована теоретически и доказана на практике [1 – 5]. Однако по вопросам качества мало жестких деталей при обработке ППД известно очень мало информации. В работе поставлена

задача – разработать технологию ППД и инструментальное оснащение, обеспечивающие повышение качества мало жестких валов при высокой производительности процесса обработки.

Зона свободного влияния

При изучении закономерностей деформации не жестких деталей, изготовленных из поликристаллических многофазных материалов, возникает необходимость рассматривать особенности взаимодействия зерен и фаз в приповерхностном объеме, отказавшись от весьма упрощенной модели изотропного однородного континуума. Влияние свободной поверхности и зерен друг на друга распространяется на некоторое расстояние, которое можно назвать зоной взаимного влияния. Зона взаимного влияния это часть поликристаллического тела, прилегающая к свободной поверхности, в пределах которой на взаимосвязанную деформацию зерен оказывает влияние свободная поверхность. Слой, прилегающий к свободной поверхности тела, толщина которого равна размеру зоны взаимного влияния, называется поверхностным слоем (ПС).

Экспериментальные исследования, проведенные на различных углеродистых сплавах, позволили установить закономерности изменения толщины зоны взаимного влияния [6]. С увеличением размера зерна количество зерен вовлеченных в совместную деформацию уменьшается при одновременном увеличении расстояния, на котором оно проявляется. В мелкозернистых материалах ($d_z = 1 - 5$ мкм) размер зоны не превышает 25 – 90 мкм. Экспериментальные данные хорошо описывает кривая [7]:

$$n_z = 25,715d_z^{-0,208}, \quad (1)$$

где n_z – число зерен в пределах зоны взаимного влияния; d_z – размер зерна, мкм.

Главная особенность объема, прилегающего к свободной поверхности, – это неоднородность напряжения течения по толщине слоя. Многочисленными исследованиями [8,9] доказано течение приповерхностного объема различных конструкционных материалов при напряжении много меньших предела текучести всего образца.

Толщина слоя (зоны взаимного влияния) r_f зависит от размера зерна d_z микроструктуры [10,11]:

$$r_f = n_z d_z,$$

где n_z – число зерен.

После подстановки эмпирического уравнения (1) получим

$$r_f = 25,715d_z^{0,792}. \quad (2)$$

Обычно размер зерна в валах изменяется от 20 мкм до 200 мкм. Поверхностный слой занимает от 5 до 75% площади поперечного сечения. Имеет место неоднородность механических свойств по поперечному сечению детали еще до ППД. Чтобы уменьшить ее необходимо увеличить напряжение в поверхностном слое и уменьшить размер зерна в пределах толщины поверхностного слоя. Сделать это можно различными методами, в том числе ППД. Упрочнение мало жестких валов, очевидно, не должно распространяться на глубину большую, чем толщина поверхностного слоя.

Упрочняющая обработка обкатником центробежного типа

Механическая обработка длинномерных валов представляет большие технологические проблемы для получения качественных деталей. Основной причиной низкого качества обработки является кинематика процесса. При вращении длинные и тонкие детали за счет центробежных сил изгибаются даже при отсутствии деформирующих усилий. Изгиб обрабатываемых участков не позволяет получать детали необходимого качества и заданной точности.

Выбор конструкции деформирующего инструмента определялся основными качественными показателями обработки поверхностного слоя. Однородность упрочнения, отсутствие изогнутости, малая величина остаточных напряжений, их уравновешенность и равномерная релаксация во время эксплуатации и другие показатели связаны с величиной усилия прижима инструмента. Инструмент должен обеспечивать постоянство этого усилия при любых изменениях формы детали, наличии пространственной погрешности и наличия колебаний в технологической системе. Чтобы избавиться от ряда проблем, обусловленных динамикой процесса, необходимо исключить вращение детали, вывести ее из непосредственного взаимодействия с патроном, задней бабкой и люнетами. В этом случае для обеспечения обработки ППД всей поверхности нежесткого вала необходимо вращать инструмент. Для исключения деформации изгиба заготовки усилием прижима деформирующего элемента необходим инструмент с полным силовым замыканием.

Для решения изложенной проблемы предложена функциональная инверсия объектов технологического процесса. Вращательное движение заготовки заменено на линейное перемещение вдоль оси, а поступательное перемещение рабочего инструмента преобразовано во вращательное. Предложенная схема обработки реализована в конструкции центробежного обкатника [12], в которой контролируется только два фактора: радиус вращения и угловая скорость. Наиболее простым решением проблемы увеличения рабочего усилия генерируемого центробежной силой является рычаг, на котором закрепляется деформирующий элемент и груз (Рис. 1).

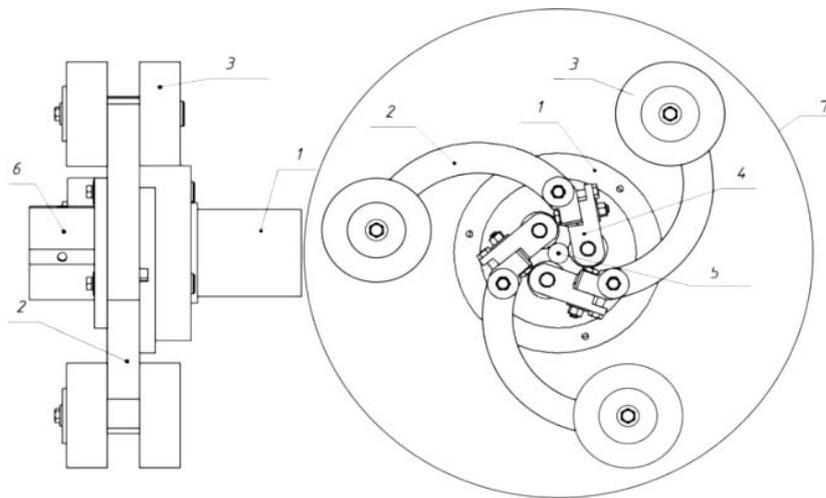


Рис. 1. Конструкция центробежного обкатника:

- 1 – корпус; 2 – криволинейный рычаг; 3 – груз; 4 – державка с деформирующим роликом;
5 – обкатываемая деталь; 6 – дополнительная опора; 7 – защитный кожух

Вся система вращается относительно неподвижной оси заготовки, и сила инерции груза создает момент относительно точки закрепления рычага, который уравновешивается моментом рабочего усилия относительно той же точки. Рабочее усилие регулируется соотношением плеч и величиной

груза. При большой величине груза достаточные для обработки ППД усилия возникают при частоте вращения обеспечиваемой стандартным оборудованием.

Расчетная глубина упрочненного слоя

Глубина упрочнения при ППД связана с основными параметрами, определяющими качество обработки: степенью деформационного упрочнения, величиной и глубиной залегания остаточных напряжений сжатия, шероховатостью и волнистостью обработанной поверхности [13, 14]. Если в качестве деформирующего тела используется ролик, то пятно контакта представляет собой эллипс. Рассматривая равновесие гидростатического ядра пластического отпечатка и деформирующего ролика, глубину распространения пластической деформации можно определить по аналитической зависимости, позволяющей рассчитать глубину упрочнения h_t в пределах зоны взаимного влияния:

$$h_t = \frac{1}{k} \left(\sqrt{\frac{(15P_3 + 65)n^2 10^{-5}}{\pi \alpha_1 \sigma_n} + \frac{1}{4}(a-b)^2} - \frac{1}{4}(a+b) \right) + t, \quad (3)$$

где a, b – полуоси эллипса пятна контакта ролика с деталью; t – глубина невосстановленной лунки, σ_n – нормальное напряжение в очаге деформации, k – коэффициент, характеризующий глубину распространения пластической деформации от давления ролика, α_1 – коэффициент, учитывающий изменение площади пятна контакта при вращении инструмента.

Значения коэффициентов, входящих в формулы (3), определяются экспериментально. Размеры полуосей a, b контура пятна контакта и глубину лунки t можно рассчитать по методике, изложенной в работе [15].

Принимая за предельную величину глубины упрочнения размер зоны взаимного влияния, можно рассчитать максимальную частоту вращения и интервал, в пределах которого необходимо искать рациональную частоту вращения центробежного обкатника. Для этого в формулу (3) подставим глубину упрочнения равную размеру зоны взаимного влияния (2). После преобразований получим

$$n = 100 \sqrt{\frac{10\pi k_\sigma \alpha_1 \left(\left(k k_d d^{0,792} - t + \frac{1}{4}(a+b) \right) - \frac{1}{4}(a-b)^2 \right)}{(15P_3 + 65)}} \cdot \sigma_{кр} \quad (4)$$

где d_s – диаметр зерна, $\mu\text{м}$; P_3 – вес груза, Н; $\sigma_{кр}$ – критическое напряжение, $\text{Н}/\text{мм}^2$; $k_d = 0,0257$; $k_\sigma = 2.5 \dots 2.6$; $k = 1 \dots 10$; $\alpha_1 = 1,4 \dots 1,6$; a, b – размеры полуосей эллипса пятна контакта.

Формула (4) позволяет определить необходимую частоту вращения обкатника, которая обеспечит формирование глубины упрочненного слоя в пределах зоны свободного влияния.

Методика экспериментального определения глубины упрочнения.

При поверхностной пластической деформации нежестких валов глубина упрочнения должна быть в пределах величины зоны взаимного влияния. При этом важно обеспечить равномерность упрочнения (одинаковость глубины) по периметру в поперечном сечении и вдоль оси вала. Необходимо стремиться к тому, чтобы минимальная величина интенсивности деформаций на цилиндрической поверхности радиуса была равномерной. Это условие должно быть обеспечено с учетом точ-

ности замера среднего размера зерна и точности экспериментального метода определения глубины деформационного упрочнения.

Изучение микротвердости по глубине поверхностного слоя показало (рис. 2), что при частоте вращения меньше 200 об/мин максимум твердости лежит на или вблизи свободной поверхности. При дальнейшем увеличении частоты вращения максимум твердости смещается вглубь.

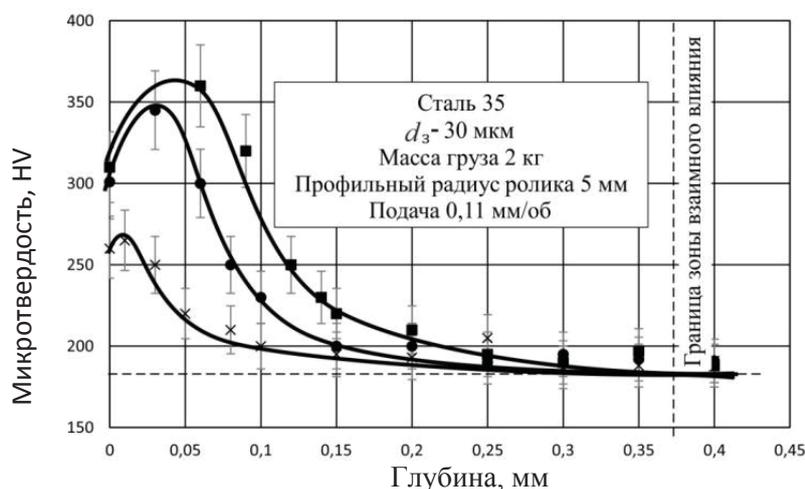


Рис. 2. Зависимость микротвердости от глубины упрочненного слоя: частота вращения обкатника ● – 315 об/мин, ■ – 400 об/мин, × – 200 об/мин

За глубину упрочнения принимали границу, на которой напряжение течения поверхностного слоя и микротвердость отличались от последующих замеров по глубине на величину интервала разброса экспериментальных данных.

Экспериментальное определение рациональной глубины упрочнения

Любые технологические воздействия преследующие цель уменьшения остаточных напряжений должны быть направлены на выравнивание механических свойств в пределах зоны взаимного влияния. Таким образом, предельная, физически обоснованная глубина упрочнения ППД нежестких деталей не может существенно превышать размера зоны взаимного влияния.

Эффективность воздействий на приповерхностный объем детали поверхностным пластическим деформированием при минимальной величине остаточных напряжений ограничена условием достижения минимально возможной шероховатости.

В то же время минимальная глубина упрочнения не может быть меньше размера зерна, а максимальная больше размеров зоны взаимного влияния. Чем меньше размер зерна, тем меньше размер зоны взаимного влияния и тем большее количество зерен в пределах этой зоны [10, 11].

Очевидно, при заданной шероховатости и размере зерна микроструктуры для валов малой жесткости существует минимальная глубина упрочнения в пределах зоны взаимного влияния, обеспечивающая достаточно низкую шероховатость и высокую несущую способность.

Для проверки этой гипотезы были проведены экспериментальные исследования на образцах из стали 35 в нормализованном состоянии, имевших длину 300 мм и диаметр 16 мм и шероховатость $R_a = 1,25; 2,5$ и $5,0$ мкм. Средний размер зерна ферритно-перлитной структуры в поверхностном слое во всех образцах составлял около 30 мкм.

Глубина упрочнения поверхностного слоя при центробежном обкатывании монотонно возрастает с увеличением числа оборотов (рис. 3, кривая 1). В исследованном диапазоне шероховатостей (5,00 – 1,25 мкм) минимальная шероховатость поверхности заготовок из стали 35 с размером зерна 30 мкм наблюдалась при частоте вращения 315 об/мин., которой соответствует глубина упрочнения около 400 мкм. Эта величина близка к толщине ослабленного поверхностного слоя (размеру зоны взаимного влияния).

Размер шероховатости существенно не изменяется по сравнению с минимальной при уменьшении глубины упрочнения почти в 2 раза (см. рис. 3). Этот экспериментальный факт позволяет утверждать, что рациональные технологические параметры обработки ППД нежестких деталей следует искать вблизи границы зоны взаимного влияния.

При всех исследованных значениях исходной шероховатости рациональная частота вращения оказалась в пределах от 280 до 320 оборотов (см. рис. 3) в минуту, что соответствует величине усилия прижима ролика около 380 – 420 Н. Шероховатость поверхности, соответствующая рациональной частоте вращения центробежного обкатника, зависит от исходной шероховатости. Чем больше исходная шероховатость, тем больше шероховатость соответствующая рациональным параметрам технологического процесса.

Глубина упрочнения поверхностного слоя монотонно возрастает при увеличении числа оборотов. Обнаружена взаимосвязь минимальной шероховатости с величиной зоны взаимного влияния. Для стали 35 при глубине упрочнения равной 330 – 520 мкм (рис. 3, кривая 1) как видно из графика получаемая после центробежного обкатывания шероховатость уменьшается несколько раз.

Как это видно из рис. 3 указанная глубина упрочнения, близка к толщине ослабленного поверхностного слоя (размеру зоны взаимного влияния). Дальнейшая деформация шероховатостей с частотой более 320 оборотов в минуту приводит к распространению пластической деформации на глубину большую, чем размер зоны взаимного влияния. При этом приповерхностный слой зерен деформируется до критической деформации, после которой он более не упрочняется.

При частоте вращения обкатника около 460 – 550 оборотов в минуту и подаче 0,11 мм/оборот наблюдали шелушение поверхностного слоя, что свидетельствует о критической деформации поверхностного слоя зерен и перенаклепе объёма, залегающего на глубине более, чем размер зоны взаимного влияния.

Размер шероховатости существенно не изменяется по сравнению с минимальной при уменьшении глубины упрочнения почти в 2 раза (см. рис. 3). Это, как известно, существенно уменьшает остаточные напряжения, возникающие от ППД. Для стали 35 упрочнение на глубину 200 мкм достаточно для полной проработки неоднородностей пластической деформации возникших в поверхностном слое от предшествующих обработок, что значительно снизит их влияние на качество обработки малоэластичных валов центробежным обкатником.

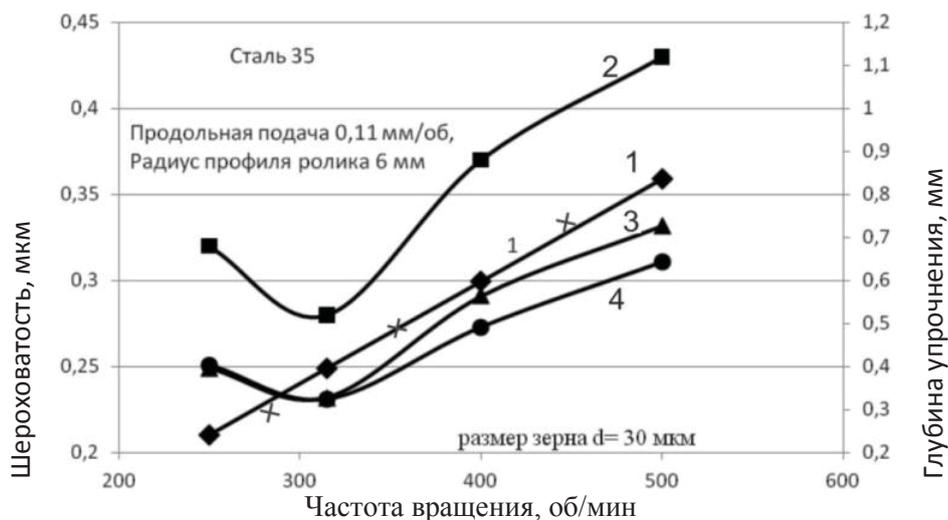


Рис. 3. Зависимость глубины упрочнения (1) и шероховатости поверхности вала (2, 3, 4) от частоты вращения центробежного обкатника:

- – исходная шероховатость $Ra = 5,0$ мкм; ▲ – исходная шероховатость $Ra = 1,25$ мкм;
- – исходная шероховатость $Ra = 2,5$ мкм;
- × - глубина упрочнения определенная экспериментально

Выводы

Результаты исследований показали, что качество обработки нежестких валов центробежным обкатником зависит от свойств и толщины зоны взаимного влияния, которая определяется средним размером зерна микроструктуры.

Разработана новая конструкция центробежного обкатника, обеспечивающая неизменность рабочего усилия, стабильность деформации и напряжений по длине упрочняемой заготовки.

Установлена теоретически и экспериментально подтверждена рациональная глубина упрочнения поверхностного слоя нежестких валов при отделочно – упрочняющей обработке ППД. Она не должна быть больше размера зоны взаимного влияния.

Список литературы

1. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. –М. Машиностроение. 1978. – 152. с.
2. Емельянов В.Н. Правка деталей машин поверхностным пластическим деформированием.– Новгород. НовГУ, 1996. –127 с.
3. Шнейдер Ю.Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. –Л, 1972. – 240 с.
4. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. –М. Машиностроение, 1988. – 240 с.
5. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М. Машиностроение, 2002. – 299 с.
6. Зайдес С.А., Горбунов А.В. Определение механических свойств поверхностного слоя маложестких валов, упрочненных поверхностным пластическим деформированием. Упрочняющие технологии и покрытия. № 3, 2015. С. 15 – 19.

7. Зайдес С.А., Горбунов А.В. Повышение качества валов малой жесткости центробежным обкатыванием. Вестник машиностроения, №12, 2015. С. 72 – 77.
8. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. –М : "Наука", 1983. – 280 с.
9. Балохонов Р., Болеста А., Бондарь М. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах. Под ред. ВЕ Панина. –Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2006. –520 с.
10. Hiroshi F. Effect of boundaries on plastic deformation // ДзайреКогаку. J. Mater. Sci. Jap. 1980. Т. 17. № 5. С. 196 – 205.
11. Miyazaki S., Shibata K., Fujita H. Effect of specimen thickness on mechanical properties of polycrystalline aggregates with various grain sizes // Acta Metallurgica. 1979. Т. 27. № 5. С. 855 – 862.
12. Патент 2124431 РФ МКИ³ кл. 6В 24 В 39/4. Станок для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрических изделий. / С.А. Зайдес. – 97105098/02; Заявлено 21.03.97. Опубл. 10.01.99, Бюл. №1.
13. Пшибыльский В. Технология поверхностной пластической обработки: Пер. с польск. –М. : Металлургия, 1991. – 479 с.
14. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М. : Машиностроение, 2000. – 318 с.
15. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. –М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

DEVELOPING EFFECTIVE TECHNOLOGY OF IMPROVING THE QUALITY OF LOW RIGIDITY SHAFT

Zaydes Semen, D. Sc. (Engineering), Professor, e – mail: zsa@istu.edu, tel.: (3952) 40-51-47

Gorbunov Andrew, Ph. D. (Engineering), Associate Professor, e – mail: gorbunov12@istu.edu, tel.: 89501446933

Irkutsk national research technical university, 83 Lermontov st. Irkutsk, 664074, Russian Federation

Abstract

The hardening depth and residual stresses in the surface layer have a direct impact on geometrical stability of non-rigid shafts. The main task of hardening is seen as a providing of the stressed state uniformity in the volume of solid. A new construction of a centrifugal roller for the effective hardening of non-rigid shafts is proposed. The calculation dependences for formation of a rational depth of a non-rigid shafts harden layer are presented. The experimental results about the determination of hardening depth according to a rotational speed of a centrifugal roller are described.

Keywords: non-rigid shaft, centrifugal roller, interference zone, hardening depth, micro-rigidity, roughness.

УДК 621.7

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ
ВОЛЬФРАМОКОБАЛЬТОВЫМИ ТВЕРДОСПЛАВНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ¹**

*БУРОВ В. Г., доктор техн. наук, профессор,
ВЕСЕЛОВ С. В., канд. техн. наук
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Буров В.Г. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: v.burov@corp.nstu.ru

Аннотация

В статье представлены результаты исследования взаимодействия железа основного металла стальных заготовок на структуру и свойства твердосплавных слоев, полученных жидкофазным спеканием твердосплавных вольфрамокобальтовых порошковых смесей. Показано, что качественные композиции «сталь - твердосплавное покрытие» с переходной зоной от основного материала к покрытию могут быть сформированы жидкофазным спеканием с использованием легирования жидкой фазы бором или созданием барьерный слой, представляющий собой композиционный материал с упрочняющей фазой из карбида титана. Наличие переходной зоны между покрытием и основным металлом, или между покрытием и барьерным слоем является обязательным условием формирования качественной композиции «сталь – вольфрамокобальтовое твердосплавное покрытие». Использование в качестве барьерного слоя соединений железа, исключая физико-физическое взаимодействие между компонентами покрытия и переходной зоной, не позволяет создать композицию. Показана принципиальная возможность формирования твердосплавного покрытия с каркасной структурой только при наличии барьерного слоя, ограничивающего диффузию железа основного металла в покрытие.

Ключевые слова: карбид вольфрама, сталь, твердосплавное покрытие, переходная зона, физико-химическая совместимость, термомеханическая совместимость.

Введение

Спеченные вольфрамокобальтовые твердые сплавы, впервые разработанные в начале прошлого века, уже почти столетие остаются наиболее широко применяемыми в промышленности, несмотря на попытки разработки других аналогичных металлокерамических композитов. Эти сплавы остаются незаменимыми в производстве инструмента, а применение их в качестве конструкционных материалов весьма ограничено. Использование вольфрамокобальтовых твердых сплавов в качестве покрытий на стальных деталях машин и механизмов не нашло достаточно широкого применения в промышленности, хотя имеются разработки, которые позволяют формировать покрытия, имеющие физико-механические свойства, близкие к свойствам спеченных твердых сплавов.

¹ Работа выполнена в Новосибирском государственном техническом университете при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства (договор № 02.G25.31.0144 от 01.12.2015 г.)

Формирование структуры твердого сплава происходит в результате спекания с образованием жидкой фазы и смачивания ею карбидных частиц. Время необходимое для смачивания карбидов расплавом кобальта составляет, ориентировочно, $\sim 10^{-3}$ с, а время смачивания поверхности частицы размером в 1 мкм - $\sim 10^{-2}$ с [1].

Попытки спечь твердый сплав на поверхности стального изделия приводят к полной или частичной деградации карбида вольфрама и активной диффузии железа из материала основы в покрытие. В результате такого спекания формируется матричный композиционный материал с развитой переходной зоной от основного материала к покрытию, содержащей крупные по размеру сложные карбиды типа $(Me)_6C$, отличающиеся повышенной хрупкостью [1]. Наличие в покрытии частиц карбида вольфрама зависит от толщины спекаемого на поверхности стальной заготовки порошкового слоя из смеси частиц карбида вольфрама и кобальта, при толщинах спекаемого слоя менее 2 мм сохранить частицы карбида вольфрама практически не удастся.

Использование вольфрамокобальтовых твердосплавных порошковых смесей для формирования покрытий предусматривает, прежде всего, повышение таких эксплуатационных свойств поверхностей стальных изделий как износостойкость в условиях трения скольжения и в условиях воздействия абразивных частиц. Требования к основному материалу изделия определяются необходимыми прочностными характеристиками. Создание композиции «основной материал – покрытие» позволяет получить сочетание эксплуатационных свойств, которое не может быть обеспечено другими методами.

В то же время, известны технологии, позволяющие сформировать твердый сплав на стальной поверхности с использованием динамических методов, таких как детонационно-газовое напыление. В результате на поверхности стального изделия можно сформировать качественный твердосплавный слой с матричной структурой [2] и практически отсутствующей переходной зоной от покрытия к основному металлу. Различие физико-механических свойств покрытия и основного материала при отсутствии переходной зоны приводит к ограничению сферы применения таких покрытий при эксплуатации в условиях высоких градиентов температур и нагрузок.

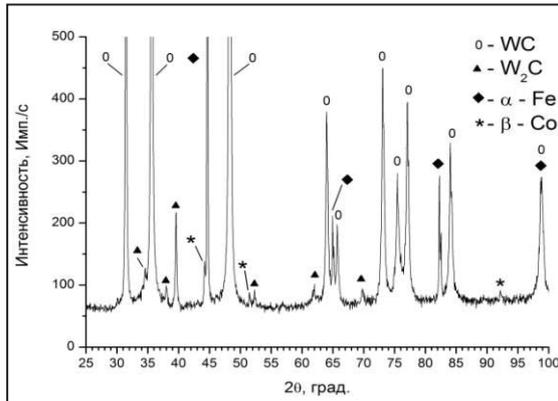
Проведенные исследования позволяют разработать рекомендации применения технологий жидкофазного спекания твердосплавных покрытий на стальных изделиях и определить ограничения их применения.

Описание теоретических и экспериментальных исследований

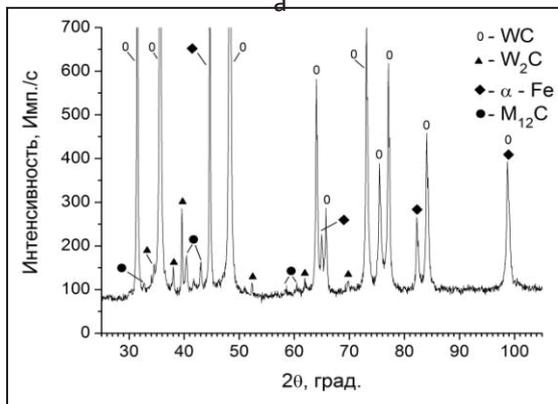
Предварительные эксперименты по спеканию в вакууме вольфрамокобальтовых твердосплавных порошковых смесей на поверхностях стальных изделий показали, что жидкая фаза (расплав, визуально наблюдаемый по появлению зеркального отражения от поверхности), начинает появляться на отдельных участках покрытия при температуре $\sim 1150^\circ C$. Однако при дальнейшем нагреве, появившееся зеркальное отражение быстро исчезает и в процессе наблюдения фиксируется чередование стадий появления локальных участков зеркала расплава и их исчезновения вплоть до температуры $1250 \dots 1270^\circ C$, при которой происходит лавинообразное увеличение количества жидкой фазы с последующим стеканием расплава с поверхности образца. Создать тонкое покрытие (толщиной менее 1 мм), которое имело бы структуру и свойства близкие к структуре и свойствам твердого сплава не представляется возможным. При спекании вольфрамокобальтовых порошковых смесей, уплотненных толстым слоем (более 1...2 мм) в стальном стакане, позволяет получить структуру покрытия, близкую к структуре спеченного твердого сплава. Покрытие связано с основным металлом развитой переходной зоной толщиной до 2 мм, отличающейся грубой структурой и наличием хрупких фаз [3, 4].

Исследование фазовых превращений при взаимодействии компонентов вольфрамокобальтовой порошковой смеси с железом ($Fe-WC-Co$) проводилось с использованием дифрактометра

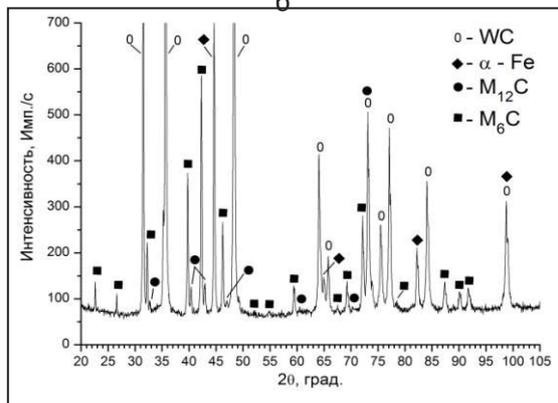
ARLXTRA как после их нагрева до 400...1200° C (рис. 1), так и *in-situ* непосредственно в процессе нагрева в высокотемпературной камере дифрактометра (рис. 2).



а



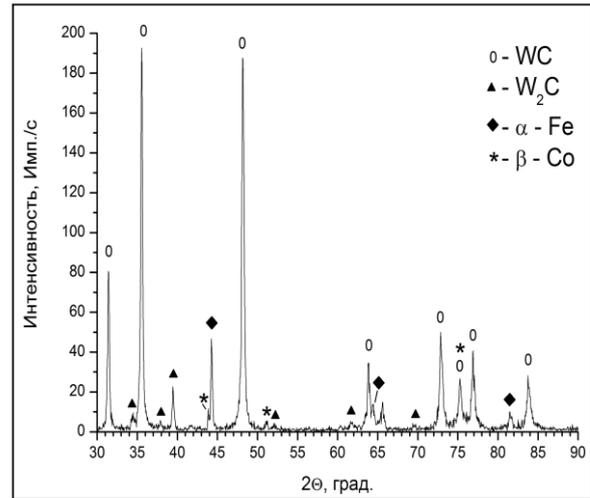
б



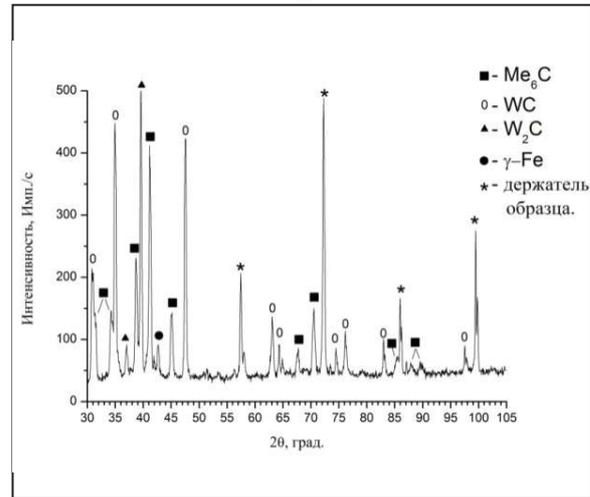
в

Рис. 1. Дифракционные картины порошковой смеси твердого сплава марки ВК6 и α -железа после нагрева до температуры: а – 600 °С; б – 800 °С; в – 1000 °С

Рентгенограммы, снятые после нагрева до температуры 800 °С свидетельствуют об образовании карбида $(Fe,W,Co)_{12}C$, которое имеет место в результате твердофазного химического взаимодействия компонентов порошковой смеси. По результатам дифференциальной сканирующей колоримет-



а



б

Рис. 2. Дифракционная картина порошковой смеси твердого сплава марки ВК6 и α -железа при температурах: а – 600 °С; б – 1200 °С

рии установлено, что сложные карбиды в исследуемых смесях образуются при температуре выше 710°C . После нагрева до температуры 1200°C , сложные карбиды насыщаются углеродом до $(\text{Fe}, \text{W}, \text{Co})_6\text{C}$. Попытки использовать высокоскоростной нагрев лазерным излучением или электронным пучком не позволяют избежать образования сложных хрупких карбидов. Возможны два пути исключения образования и сохранения хрупких фаз при жидкофазном спекании твердосплавной порошковой смеси на стальной заготовке:

- полное исключение диффузии железа основного металла в спекаемое покрытие;
- изменение химического состава жидкой фазы путем введения легирующих элементов, снижающих температуру ее появления и связывающих диффундирующее железо основного металла, сохраняя, таким образом, углерод для формирования твердосплавного слоя.

Первый путь дает основание на создание твердосплавного покрытия, имеющего каркасную структуру, но есть проблема формирования переходной зоны между покрытием и основным металлом. Второй путь исключает возможность формирования каркасной структуры – формируемый композиционный материал покрытия будет иметь матричную структуру и развитую переходную зону между покрытием и основным металлом. Таким образом, задача исследования заключается в разработке технологических приемов, позволяющих выполнить требования химико-термической и термомеханической совместимости компонентов покрытия и основного металла.

Обеспечение физико-химической совместимости предусматривает исключение образования промежуточных хрупких фаз в поверхностном слое (в материале покрытия и в материале переходной зоны между покрытием и основным металлом). Термомеханическая совместимость предусматривает наличие переходной зоны, обеспечивающей распределение напряжений в формируемой композиции, исключающей ее разрушение как на стадии формирования, так и на стадии эксплуатации.

Результаты и обсуждение

В качестве легирующего компонента использовался бор, который вводился в состав порошковой смеси в порошковом виде, или путем насыщения основного металла перед спеканием твердосплавного слоя. Количество вводимого бора в твердосплавную порошковую смесь определяется количеством образующейся жидкой фазы, представляющей собой эвтектики $\text{Co-Co}_2\text{B}$ и $\text{Fe-Fe}_2\text{B}$, температура плавления которых 1102°C и 1135°C , соответственно. При использовании технологии пред-

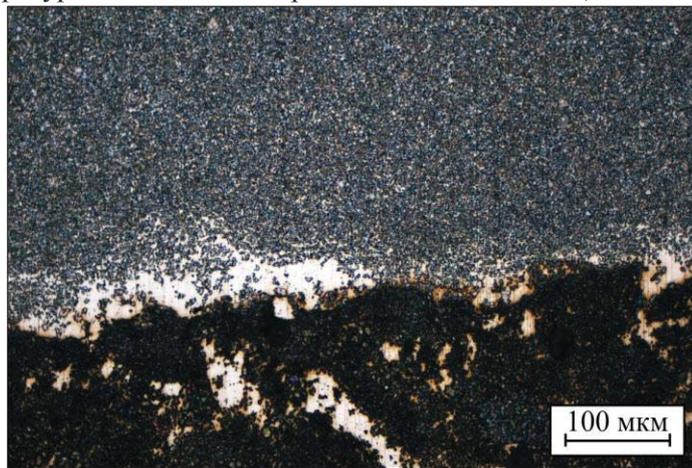


Рис. 3. Граница раздела «покрытие – барьерный слой» в спеченной композиции «ВК6 – (60 % TiC + 40 % Co) – сталь 20»

варительного модифицирования бором поверхностного слоя стальной заготовки, время и температура насыщения бором оказывают влияние на толщину и свойства переходной зоны [5, 6]. Из двух способов введения легирующего бора, первый отличается технологической простотой, второй – стабильностью толщины переходной зоны. Наличие переходной зоны позволяет проводить закалку основного металла без разрушения композиции. Связывание бором железа, диффундирующего из основного металла в покрытие, позволяет исключить отрицательное влияние железа как карбидообразующего металла с карбидом вольфрама [7].

Создание твердосплавного покрытия с каркасной структурой возможно только при полном исключении диффузии компонентов основного металла в спекаемый слой, чего можно добиться созданием барьерного слоя, который, с одной стороны, имеет переходную зону с основным металлом, с другой – со спекаемым покрытием. Отсутствие переходных зон между барьерным слоем и основным металлом, а также между барьерным слоем и со спеченным слоем, приводит к отслаиванию сформированного покрытия без приложения каких-либо внешних нагрузок уже на стадии охлаждения композиции. Так, например, насыщение поверхностного слоя стальной заготовки азотом препятствует протеканию диффузионных и химических взаимодействий на границе «модифицированный слой стали – твердосплавное покрытие» и сформированный твердосплавный слой отслаивается от барьерного слоя. Использование в качестве барьерного слоя порошковой композиции $TiC+Co$ позволяет спекать твердосплавное покрытие с каркасной структурой (рис. 3) и прочной связью барьерного слоя с основным металлом и с покрытием. При этом в покрытии отсутствуют хрупкие сложные карбиды. Жидкофазное спекание твердосплавного покрытия и барьерного слоя можно осуществлять как раздельно, так и за один цикл спекания, предварительно сформировав два слоя порошковых смесей (для барьерного слоя и для покрытия). Температура появления жидкой фазы соответствует температуре спекания твердосплавных смесей и находится в диапазоне 1360...1400 °С. Жидкофазное спекание вольфрамокобальтовых твердосплавных покрытий на стальных заготовках предусматривает нахождение основного металла при температурах, приводящих к формированию крупнозернистой структуры. Проведенные исследования подтверждают возможность проведения термической обработки композиции в защитной атмосфере без внесения структурных дефектов как в покрытие, так и переходную зону.

Выводы

Формирование качественных покрытий путем жидкофазного спекания твердосплавных вольфрамокобальтовых порошковых смесей на стальных изделиях возможно при ограничении взаимодействия химического взаимодействия железа основного металла с частицами карбида вольфрама легирования композицией введением в спекаемую систему бора, снижающего температуру появления жидкой фазы, или путем создания барьерных слоев. Введение легирующего бора в виде аморфных частиц в состав твердосплавной порошковой смеси позволяет формировать композиции «сталь-вольфрамокобальтовое твердосплавное покрытие с матричной структурой» с развитой переходной зоной толщиной равной толщине твердосплавного слоя. Введение в состав композиции легирующего бора путем предварительной химико-термической обработки стальной заготовки позволяет создавать композиции, толщина переходной зоны которых определяется температурно-временными режимами насыщения бором поверхностного слоя стали. Наличие развитой переходной зоны позволяет проводить закалку основного металла полученной композиции без повреждения структуры и свойств покрытия.

При необходимости спекания на изделиях из углеродистых сталей вольфрамокобальтового твердосплавного покрытия с каркасной структурой следует использовать барьерные слои, ограничивающие диффузионный перенос железа основного металла в спекаемую вольфрамокобальтовую порошковую смесь, но обеспечивающие формирование переходных зон ними и основным металлом, с одной стороны, и со спекаемым вольфрамокобальтовым твердым сплавом – с другой.

Список литературы

1. Буров, В. Г. Изменение геометрии порошкового композита WC – Co – В в процессе спекания на железосодержащей подложке [Текст] / В. Г. Буров // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП – 1998) = 4 International conference on actual problems of electronic instrument engineering : proceeding. АРЕПЕ–1998 : тр. 4 междунар. конф., Новосибирск, 23 – 26 сент. 1998 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1998. – Т. 15. – С. 53 – 54.
2. Binary fuel detonation spraying of WC/Co / V. Ulianitsky, I. Batraev, I. Smurov, A. Nikulina // International thermal spray conference and exposition, ITSC 2014 : abstr., Spain, Barcelona, 21–23 May 2014 (including manuscripts on CD-ROM). – Düsseldorf : DVS Media Gmb, 2014. – S. 985 – 988. – (DVS-Berichte ; vol. 302). – ISBN 978 – 3 – 87155 – 574 – 9.
3. Структурообразование твердосплавных покрытий на стальной поверхности [Текст] / В. Г. Буров, А. А. Батаев, А. Г. Тюрин, С. В. Буров // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2005. – № 1 (26). – С. 9 – 12.
4. Влияние реакционной активности основного металла и компонентов наплавляемого покрытия на структуру поверхностного слоя [Текст] / В. Г. Буров, С. В. Веселов, А. А. Дробяз, Д. С. Терентьев // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2009. – № 4 (45). – С. 23 – 24.
5. Влияние режимов предварительной химико-термической обработки на свойства стали, упрочненной покрытием на основе порошковой смеси WC-Co [Текст] / В. Г. Буров, И. А. Батаев, С. В. Веселов, А. А. Батаев, А. Г. Тюрин, С. В. Буров // Ползуновский вестник. – 2005. – № 2. – С. 4 – 9.
6. Структурообразование твердосплавных покрытий на стальной поверхности [Текст] / В. Г. Буров, А. А. Батаев, А. Г. Тюрин, С. В. Буров // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2005. – № 1 (26). – С. 9 – 12.
7. Курлов А.С., Гусев А.И. Физика и химия карбидов вольфрама/ А.С. Курлов, А.И. Гусев // Физматгиз. М. – 2014. – 272 с.

**TECHNOLOGICAL FOUNDATIONS OF STEEL MACHINE PARTS STRENGTHENING
WITH CEMENTED CARBIDE COATINGS**

Burov V.G., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: v.burov@corp.nstu.ru

Veselov S.V., C.Sc. (Engineering), Associate professor, e – mail: veselov@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, prospekt K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The paper contains the results of investigation of steel machine part substrate iron effect on cemented carbide layer structure and properties made by tungsten carbide – cobalt powder blend liquid-phase sintering. It was shown that high quality “hard metal coating – steel substrate” compositions with transition zone can be obtained by liquid -phase sintering applying liquid phase boron doping or applying barrier layer consisted of composite material with titanium carbide strengthening phase. To obtain high quality “tungsten carbide/cobalt coating – steel substrate” composition the transition zone must be formed. An application of iron chemical compounds as a barrier layer which eliminate any interaction between coating components and substrate does not allow creating composition. It was shown that formation of cemented carbide coating with scaffold structure is possible only applying the barrier layer limiting iron diffusion from substrate to the coating.

Keywords: tungsten carbide, steel, cemented carbide coating, interface region, physical – chemical comparability, thermomechanical compatibility.

Acknowledgments

The research was performed at Novosibirsk State Technical University under the financial support of the Ministry of education and science of the Russian Federation in the framework of implementation of the complex project devoted to the development of high-tech manufacturing (contract № 02.G25.31.0144 on 01.12.2015 г.).

ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ ЛАЗЕРНО – ПЛАЗМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

*ГЕРБЕР А. Ю., аспирант
(СГУВТ, г. Новосибирск, Россия)*

Гербер А. Ю. – 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33,
Сибирский государственный университет водного транспорта,
e – mail: gerber_artem@bk.ru

Аннотация

Представлены результаты эксперимента по влиянию лазерно – плазменного воздействия на строение и микротвердость поверхности малоуглеродистой стали со структурой феррит – перлит. Материалом исследования послужила малоуглеродистая низколегированная сталь 10Г2С1 ГОСТ 19281 – 89 в состоянии поставки. Для исследования подготовленные образцы стали были закреплены на планшайбу и подвергнуты лазерно – плазменному воздействию, впоследствии были получены упрочненные лазером дорожки. Для изучения микроструктуры сделаны микрошлифы, на которых с помощью микротвердомера был изучен структурный состав и измерена микротвердость. По результатам измерений был построен график микротвердости структурных составляющих. В результате было выявлено, что лазерно – плазменная обработка (ЛПО) позволяет производить упрочнение поверхности малоуглеродистой стали до высокой (10,0 – 12,7 ГПа) твёрдости на глубину в пределах 0,2 мм.

Ключевые слова: лазерно – плазменная обработка, поверхностная закалка, структура малоуглеродистой стали.

Введение

Малоуглеродистая сталь является привлекательным материалом для изготовления деталей, имеющих твёрдую износостойкую поверхность для восприятия контактных нагрузок в сочетании с вязкой трещиностойкой средней частью, работающей в условиях объёмного нагружения [1]. Традиционными методами поверхностного упрочнения малоуглеродистой стали являются химикотермическая обработка, поверхностное легирование и нанесение износостойких покрытий. С развитием технологии лучевой обработки в распоряжении технологов появляются новые средства формирования поверхностной структуры, обеспечивающей повышенные эксплуатационные свойства [2, 3].

Высокая концентрация энергии обеспечивает при воздействии лазерного луча на поверхность металла достичь скорости локального нагрева, превышающей тысячи градусов в секунду. Глубина области фазовых превращений в железоуглеродистых сплавах при этом достигает 1 мм. После прохождения луча нагретый участок оказывается в окружении холодного металла, что приводит к быстрому охлаждению и закалке [4 – 8].

Методика экспериментального исследования

Лазерно – плазменную обработку проводили в ИЛФ СО РАН на лазерно – плазменной технологической установке [9 – 10].

Режимы лазерно-плазменного воздействия были выбраны на основании литературных данных [11 – 15] и результатов ранее проведённых исследований. Энергия лазерного импульса составляла около 15 мДж при частоте следования импульсов 60 кГц.

Излучение фокусировалось в пятно диаметром 0,8 мм, длительность пика лазерных импульсов на полувысоте составляла 0,2 мкс, таким образом пиковая интенсивность импульса достигала 14 МВт/см². В качестве рабочего газа использовался азот, давление азота в форкамере составляло 2 атм. Скорость линейного перемещения образцов составляла 15 мм/сек.

В результате ЛПО на стали 10Г2С1 были получены упрочненные лазером дорожки, которые в дальнейшем подверглись микроструктурному анализу.

Микрошлифы образцов стали для исследования готовились под углом 12⁰ к плоскости обработанной поверхности, благодаря этому на представленных микрофотографиях кажущаяся глубина рассматриваемого сечения и шероховатость поверхности увеличены в 5 раз. Твёрдость измерялись на микротвердомере ПМТ – 3 при нагрузке на индентор 20 г.

Результаты и обсуждение

Структурные превращения в стали при ЛПО определяются градиентом температур. Глубина закалённых слоёв и структура зон термического лазерно – плазменного воздействия зависит от исходной структуры и параметров лазерно-плазменной обработки, но при этом имеют место общие закономерности.

Наиболее высокая температура, вызывающая плавление и испарение материала, при лазерной обработке возникает на поверхности обрабатываемых изделий. При последующем охлаждении за счёт интенсивного теплоотвода в холодную сердцевину металла в зоне плавления происходит закалка из жидкого состояния (ЗЖС) и образование мартенсита с микротвёрдостью 11,0 – 13,0 ГПа. К участкам ЗЖС прилегает зона мартенсита, с твёрдостью 6,0 – 7,0 ГПа, полученного закалкой при охлаждении из твёрдого аустенитного состояния. Во время исследования было получено несколько дорожек, отличающихся скоростью следования луча по образцу. Скорость варьировалась от 5 до 22 мм/с. С ростом скорости следования уменьшается глубина закаленного слоя стали. Микроструктуру стали 10Г2С1 подробнее рассмотрим на примере дорожки, обработанной со скоростью 15 мм/с. В результате ЛПО на поверхности материала образовалась структура закалки из жидкого состояния (мартенсит) на глубину 0,2 мм с твердостью от 10 до 12,70 ГПа. Далее следует зона термического влияния со структурой закалки из твердого состояния, распространяющаяся на глубину до 1 мм и твердостью от 6 до 9 ГПа. На глубине 1 мм заканчивается зона термического влияния и наблюдается исходная структура материала. Распределение структурных составляющих по сечению зоны лазерно – плазменного воздействия и их твёрдость приведены на рис. 1, рис. 2. Общая глубина упрочнённого слоя составляет 1 мм.

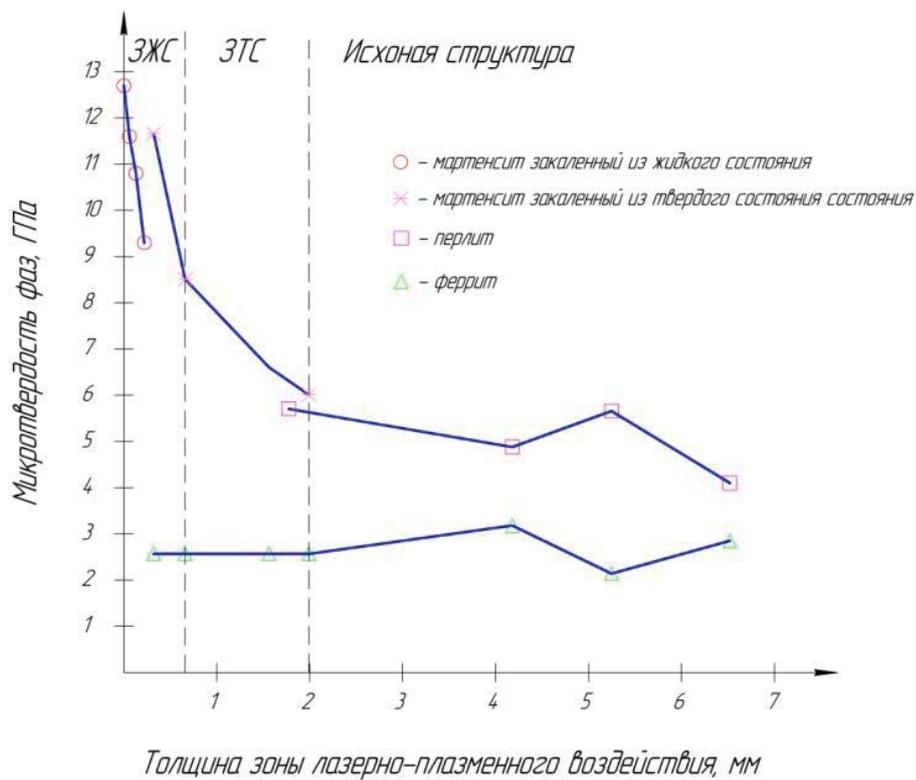


Рис. 1. Микротвёрдость структурных составляющих по глубине зоны лазерно – плазменного воздействия в стали с исходной структурой – феррит – перлит

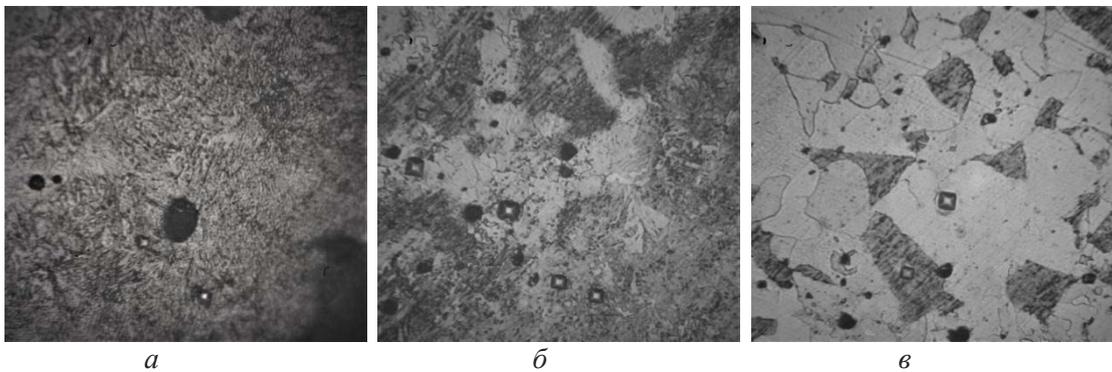


Рис. 2. а) зона закалки из жидкого состояния (ЗЖС); б) зона закалки из твердого состояния (ЗТС); в) исходная структура

Выводы

Исследования микроструктуры стали 10Г2С1 показали, что с помощью ЛПО малоуглеродистую сталь можно закалить на твердость до 12,70 ГПа на поверхности с распространением зоны термического влияния на 1 мм в глубину материала. Лазерно – плазменная обработка может стать альтернативой таким методам поверхностного упрочнения малоуглеродистой стали, как химикотермическая обработка, поверхностное легирование и нанесение износостойких покрытий.

Список литературы

1. Солнцев, Ю. П. *Материаловедение* / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – СПб. : ХИМИЗДАТ, 2007. – 784 с.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. *Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов под ред. А.Г. Григорьянца.* – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664с.
3. Гуреев, Д. М. Ямщиков С.В. *Основы физики лазеров и лазерной обработки материалов* : учеб. пособие. – Самара: Са-мар. ун-т. – 2001. – С. 392.
4. Сафонов, А. Н. Изучение структуры и твердости поверхности железоуглеродистых сплавов после их оплавления лазерным излучением. / *МиТОМ*, 1999. – № 1. – С.7 – 10.
5. *Лазерные технологии на машиностроительном заводе* Текст. / Н.Г. Терегулов [и др.]. Уфа: АН Респ. Башкортостан. – 1993. – С. 263.
6. Об использовании технологии лазерной обработки материалов в судовом машиностроении / Г. Н. Гаврилов, Л. А. Чкалов, Э. В. Максимова, О. В. Горшков // *Технология судостроения*. 1989. - №5. – С. 51 – 52.
7. Садовский В.Д., Табатчикова Т.И., Салохин А.В., Малыш М.М. Фазовые и структурные превращения при лазерном нагреве стали. I. Влияние исходной структуры. *ФММ*. - 1982. – Т.3. – Вып. 1. – С. 88 – 94.
8. Шатилов И.Р., Костромин С.В. Влияние исходной структуры стали 30ХГСА на строение и свойства поверхностного слоя после лазерного термоупрочнения // *Фундаментальные и прикладные науки сегодня: Материалы Международной научно-практической конференции (Москва, 25 —26 июля 2013 г.)* — Т. 1. North Charleston: CreateSpace, 2013. — С. 117 — 120.
9. Влияние предварительной термообработки конструкционной стали на эффект упрочнения при лазерно-плазменном воздействии / С. Н. Багаев [и др.] // *Актуальные проблемы в машиностроении.* – НГТУ, – 2016. – № 3. – С. 389 – 397.
10. Применение метода лазерно – плазменной модификации поверхности металлов для улучшения триботехнических характеристик цилиндров двигателей внутреннего сгорания // С. Н. Багаев [и др.] // *Обработка металлов.* – НГТУ. – 2014. – С. 14 – 23.
11. Стаценко П.А., Грачев Г.Н., Смирнов А.Л., Мякушина А.А. Исследование пространственных характеристик излучения мощной СО₂-лазерной системы генератор-усилитель // *Сб. докл. 22-й между. конф. «Лазеры. Измерения. Информация – 2012».* Санкт-Петербург, 2012. Т. 2. С. 168 – 176.
12. Майоров В.С. Расчет параметров лазерной закалки со сканированием // *Физика и химия обраб. материалов.* — 1989. №1. — С.38 – 43.
13. Расчет размеров износостойких поверхностных слоев, получаемых лазерным упрочнением конструкционных сталей Текст. / Н.Н. Дорожкин [и др.] // *Трение и износ*. 1986. – Т.7, №6. – С. 1054 – 1061.
14. Кокора А.Н., Соболев Э.Н. Расчет толщины закаленного слоя при лазерной термообработке стали без оплавления поверхности // *Инженерно-физический журнал*. 1989. – Т.56, №4. – С. 632 – 639.

15. Багаев С.Н., Грачев Г.Н., Смирнов А.Л., Смирнов П.Ю. «Способ модификации металлических поверхностей и устройство» // Патент № RU 2 425 907 С2. Опубликовано: 10.08.2011 Бюл. № 22).

SURFACE HARDENING LOW CARBON STEEL IN LASER-PLASMA TREATMENT

Gerber A.J., Postgraduate, e – mail: gerber_artem@bk.ru

Siberian State University of Water Transport, 33 Shhetinkina St., Novosibirsk, 630099, Russian Federation

Abstract

The presented results reflect the experiment on the impact of laser-plasma action on the structure and microhardness of the structural steel surface which ferrite-pearlite structure. The polyfunctional CO₂ – laser oscillator - amplifier system was used as a means of technology equipment. As a material for study, the sheet structural low-alloyed steel 10Г2С1 GOST 19281 – 89. To study the microstructure made microsections, which via micro durometer structural composition was examined and measured microhardness. The obtained data show that laser-plasma treatment LPT allows to perform hardening of structural steel surface which achieves high (10,0 – 12,7 GPa) solidity reaching the depth of about 0,2 mm. It is possible to use the laser-plasma treatment as a method for local surface hardening in the manufacturing process.

Keywords: Laser plasma, surface hardening, low carbon steel.

УДК 621.7.011

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Нго Као Кыонг, аспирант,
ЗАЙДЕС С. А., доктор техн. наук, профессор
(ИркутскНИИХиммаш, г. Иркутск, Россия)*

Нго Као Кыонг – 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
e – mail: cuong.istu@gmail.com, zsa@istu.edu

Аннотация

На основе теории малых упругопластических деформаций и метода конечных элементов построены математические модели процесса упрочнения, позволяющие определять напряженное состояние образцов в зависимости от формы и кинематики индентора. Рассмотрено влияние некоторых схем деформирования на напряженное состояние: обкатывание качением, обкатывание скольжением, обкатывание одним и двумя роликами с вращением относительно диаметральной оси. Выявлено, что основными факторами, оказывающими влияние на напряженно-деформированное состояние деталей являются геометрия, форма, взаимное расположение элементов деформирующего инструмента и их кинематика относительно обрабатываемой детали.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, интенсификация деформации, напряженное состояние, пластическое деформирование, упрочнение, индентор.

Введение

В технологических процессах изготовления деталей машин поверхностное пластическое деформирование (ППД) применяется, в основном, для повышения качества и упрочнения поверхностного слоя изделий. В результате упрочняющей обработки повышается износостойкость деталей, стойкость к коррозионным воздействиям, усталостная прочность, герметичность и др. Во многих случаях применением ППД удается повысить запасы прочности деталей, работающих при переменных нагрузках, в 1,5 – 3 раза и увеличить срок службы деталей в десятки раз [1 – 4].

Целью данной работы является разработка новых технологических схем ППД, обеспечивающих интенсификацию напряженного состояния в очаге упругопластической деформации при локальном деформирующем воздействии.

Методика экспериментального исследования

Согласно современной дислокационной теории основные механизмы упрочнения, обеспечивающие повышение напряжения пластического течения, можно классифицировать на основе геометрических размеров «препятствий», тормозящих движение дислокаций (элементами субструктуры, границами зерен, растворенными атомами, дислокациями, дисперсными частицами) [5].

Деформационное упрочнение при пластической деформации возникает из-за увеличения числа дефектов кристаллического строения, затруднения движения дислокаций, когда исчерпываются

возможности скольжения (двойникования) в данных плоскостях. При этом происходит повышение их плотности и увеличение кривизны дислокаций, образуются точечные дефекты и барьеры типа Ломе-ра — Коттрелла, фрагменты и пересечения плоскостей скольжения, ступеньки на дислокациях, узлы и другие сложные дислокационные построения [6, 7]. Следовательно, постепенно увеличивающаяся искаженность решетки повышает сопротивление деформации и уменьшает пластичность. Наибольшее значение имеет увеличение плотности дислокаций, так как возникающее при этом между ними взаимодействие тормозит дальнейшее их перемещение.

Таким образом, пути повышения прочностных свойств сплавов и сталей заключаются в разработке упрочняющих технологий, обеспечивающих формирование такого структурного состояния материала, при котором максимально реализуются основные принципы дислокационной теории упрочнения. Интенсификация напряженного состояния может быть достигнута, если будет усилено деформационное искажение зерен материала. Отсюда вытекает технологическая задача: необходимо создать такую конструкцию и кинематику рабочего инструмента, которые бы при поверхностном пластическом деформировании усиливали искажение структуры материала при сохранении качества поверхности.

Схемы поверхностного пластического деформирования

В практике ППД известны и широко используют две схемы упрочняющей обработки: упрочнение по схеме качения рабочего инструмента (рис. 1а) и упрочнение по схеме скольжения (рис. 1б). Последнюю схему значительно реже используют на практике, т.к. трение скольжения в зоне контакта приводит к большим тепловым процессам, а сам инструмент интенсивно изнашивается. Однако, если оценить эти две схемы упрочнения с точки зрения механики процесса и возможности деформационного искажения микроструктуры, то обработка по схеме скольжения представляется более эффективной.

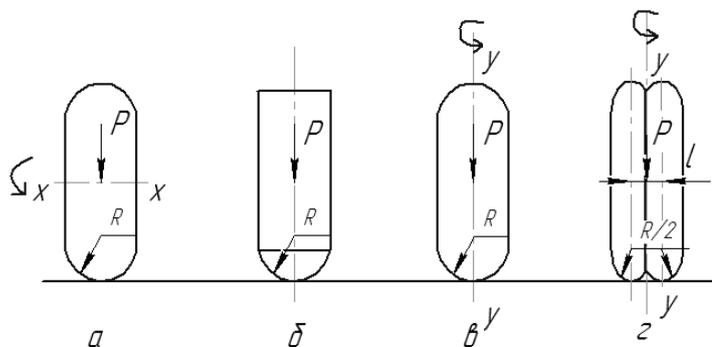


Рис. 1. Схемы нагружения при различных условиях контакта с обрабатываемой поверхностью (x-x, y-y: оси вращения)

Техническая идея по интенсификации напряженного состояния в очаге деформации заключается в изменении кинематики рабочего инструмента, которая будет усиливать искажение зеренной структуры материала. Предлагается вращать деформирующий ролик не относительно горизонтальной оси, а относительно вертикальной (рис. 1в). В этом случае пластический отпечаток от ролика на поверхности детали, представляющий собой фигуру в виде эллипса, постоянно изменяет ориентацию большой и малой оси. При вращении ролика вокруг вертикальной оси $y-y$ происходит наложение пластических полей разных ориентаций по направлению, что должно способствовать «перемешиванию» структуры в поверхностном слое.

Если совместить два ролика вместе и вращать их также относительно оси у-у (рис. 1г), то эффективность обработки должна быть еще выше, так как в процессе деформирования участвует не два, а четыре очага деформации на каждый оборот ролика.

Конечно – элементное моделирование процесса

Для анализа напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при упрочнении различными способами ППД, и для исследования формирования временных и остаточных напряжений успешно применяется компьютерное моделирование, в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Одной из универсальных и широко применяемых программ, реализующих МКЭ, является ANSYS, которая и была использована в данной работе.

Моделирование упрочняющей обработки и процессов, протекающих в поверхностном слое деталей при ППД, осложнено рядом факторов, не учитываемых в аналитических расчетах и при моделировании технологических остаточных деформаций в статике. Фактор времени является наиболее значимым. Формирование поверхностного слоя, упрочненного ППД, в отличие от статического моделирования, производится с помощью моделирования реального воздействия деформирующих элементов на материал модели. Динамическое моделирование упрочняющей обработки позволяет исследовать эффект упрочнения и производить полный цикл определения временных, остаточных напряжений и остаточных деформаций [8].

Формирование геометрии расчетной области в программе проводили последовательно согласно схемам нагружения цилиндрической поверхности образца жестким роликом (см. рис. 1). Упрочняющая обработка в программе представляет собой реальное перемещение инденторов во времени относительно упрочняемого образца. Траектория движения упрочняющих тел воспроизводит режим работы упрочняемой детали. Приняты следующие режимы обработки: глубина внедрения рабочего инструмента $t = 0,1$ мм, частота вращения инструмента и образца соответственно $n_1 = 600$ и $n_2 = 100$ об./мин., подача инструмента $s = 0,2$ мм/об, коэффициент трения в зоне контакта $f = 0,2$.

Характеристики образца: форма поверхности — цилиндрическая диаметром 25 мм; материал — сталь 45 — упругопластический, упрочняющийся; модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; диаграмма деформирования материала — билинейная, описываемая пределом текучести $\sigma_m = 360$ МПа, модулем упрочнения $E_t = 1,45 \cdot 10^3$ МПа.

Характеристики индентора: тип — ролик с приведенным радиусом $R = 5$ мм; материал — твердый сплав ВК8; модуль упругости $E = 6 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Техническим результатом данного исследования является расширение возможностей обработки ППД и диапазона достижимых параметров механического состояния металла поверхностного слоя за счет применения деформирующего ролика со специальной формой профиля рабочей поверхности и его кинематики относительно обрабатываемой поверхности.

Результаты моделирования

Напряженное состояние материала при деформационном упрочнении можно условно разделить на временное и остаточное. Первое из них возникает при действии внешних сил, второе - при их отсутствии. Временное напряжение влияет на энергосиловые характеристики процесса, степень и глубину упрочненного слоя, давление в зоне контакта, шероховатость поверхности заготовки, прочность и стойкость деформирующего инструмента, а остаточные напряжения - на усталостную прочность, процесс разрушения, износостойкость, коррозию и другие эксплуатационные свойства изделий [9,10]. Эквивалентное напряжение по Мизесу при использовании главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 вычисляется как [5]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

На рис. 2, 3 приведены примеры распределения остаточных эквивалентных напряжений в поперечном сечении и компонент напряжений вдоль радиуса образца при режиме: глубина внедрения $t = 0,1$ мм, подача $s = 0,2$ мм/об., чистота вращения образца $n_2 = 100$ об./мин. и инструмента $n_1 = 600$ об./мин.

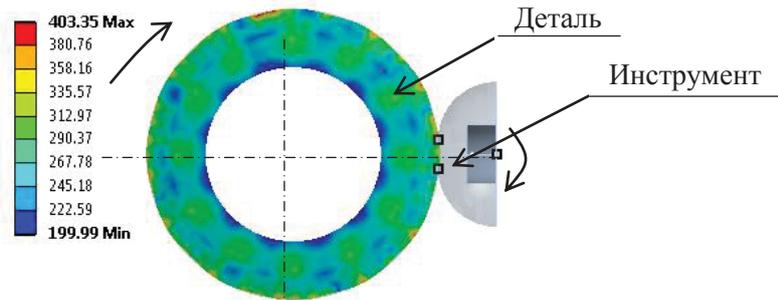


Рис. 2. Распределение остаточных эквивалентных напряжений в поперечном сечении образца (схема г, рис.1)

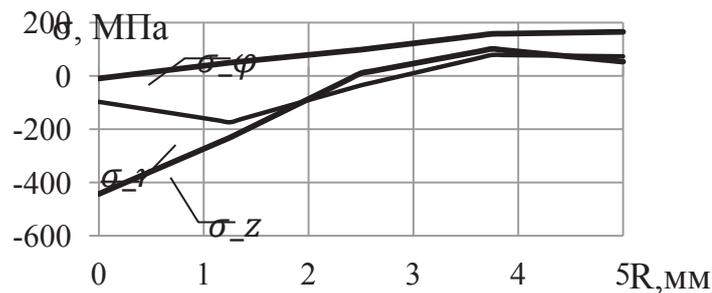


Рис. 3. Распределение компонент остаточных напряжений вдоль радиуса образца (схема г, рис.1)

На рис. 4 показано влияние схем деформирования на максимальное эквивалентное остаточное напряжение. А в таблице представлены компоненты максимальных временных и остаточных напряжений. При ППД качением (простое обкатывание, см. рис. 1 а) происходит минимальное искажение структуры. При условии ППД скольжением (см. рис. 1 б) возникает большое трение, которое приводит к повышению интенсивности напряжения в зоне деформации. При ППД с вращением ролика относительно своей диаметральной оси у-у (см. рис. 1 в) за счет разных положений очага деформации напряжения усиливаются. Наиболее эффективный результат получен при ППД с вращением двух роликов относительно оси у-у (см. рис. 1 г). В результате применения конструкции профиля рабочей части двухрадиусного обкатного ролика металл поверхностного слоя детали при обработке находится в условиях сложного напряженного состояния, испытывает пластическую деформацию с накоплением большого числа искажений.

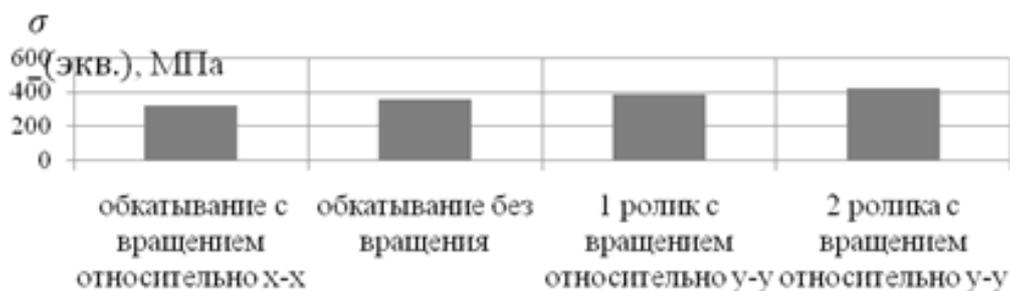


Рис. 4. Влияние схем деформирования на максимальные значения Эквивалентных остаточных напряжений

Влияние схем деформирования на компоненты максимальных временных и остаточных напряжений

| Схемы обработки | $\sigma_{\phi}^{вр.}$, МПа | $\sigma_r^{вр.}$, МПа | $\sigma_z^{вр.}$, МПа | $\sigma_{\phi}^{ост.}$, МПа | $\sigma_r^{ост.}$, МПа | $\sigma_z^{ост.}$, МПа |
|--|-----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Обкатывание с вращением относительно x-x | -970 | -730 | -799 | -189 | -35 | -288 |
| Обкатывание без вращения | -1128 | -750 | -815 | -206 | -79 | -312 |
| Один ролик с вращением относительно y-y | -1135 | -810 | -870 | -241 | -90 | -317 |
| Два ролика с вращением относительно y-y | -1181 | -868 | -914 | -262 | -115 | -322 |

Важным элементом механики процесса деформирования и структурообразования является расстояние между очагами пластических отпечатков, которое должно быть оптимальным для обеспечения интенсификации деформационного процесса. Первый деформирующий элемент полностью работает в зоне очага деформации, создаваемой вторым деформирующим элементом, происходит перекрытие и «перемешивание» двух очагов и их слияние в один комплексный очага деформации. Существует оптимальное расстояние между вершинами роликов (в нашем случае $l = 1,2 - 1,6$ мм), при котором обеспечивается формирование максимальных напряжений в очаге деформации (рис. 5). При $l > 3$ мм очаги деформации не влияют друг на друга, и можно считать, что двухрадиусный ролик работает почти как обычный ролик.

На рис. 6 показано влияние глубины внедрения двухрадиусного ролика на максимальное эквивалентное напряжение и компоненты максимального остаточного напряжения образца. Увеличение глубины внедрения ролика приводит к повышению степени деформации и плотности дислокаций, следовательно, растут и значения напряжений.

На рис. 7 представлено влияние величины подачи двухрадиусного ролика на максимальные значения эквивалентных остаточных напряжений и компоненты максимальных остаточных напряжений. Уменьшение подачи приводит к местному увеличению деформации обкатываемой поверхности. Подача инструмента при используемых режимах обработки (в нашем случае $0,1 - 0,2$ мм/об.) практически не влияет на уровень остаточных напряжений. При постоянной глубине внедрения деформирующего инструмента изменение подачи почти не оказывает влияние на величину временных напряжений (см. рис. 7а).

Но увеличение подачи до большего значения (0,4 - 0,6 мм/об.) приводит к уменьшению остаточных напряжений из-за неравномерного перекрытия очагов пластической деформации.

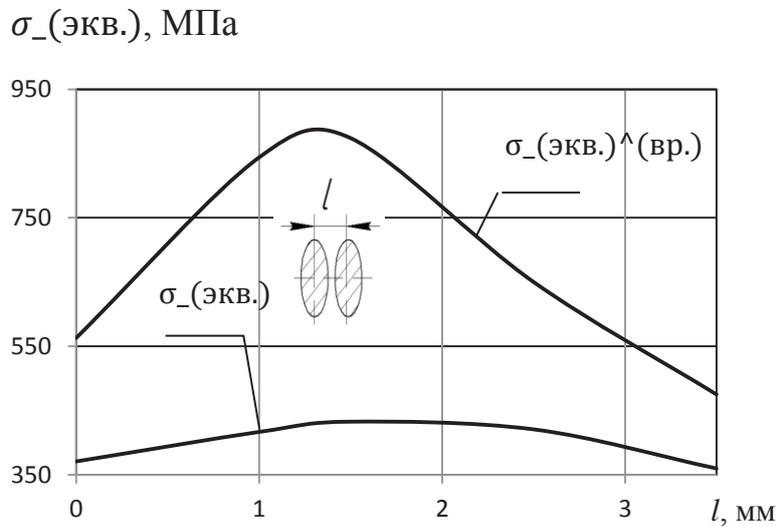


Рис. 5. Влияние расстояние между пластическими отпечатками (l) на максимальную величину эквивалентных временных и остаточных напряжений образца ($n_1 = 1200$ об/мин., $n_2 = 100$ об/мин., $t = 0,1$ мм, $s = 0,2$ мм/об)

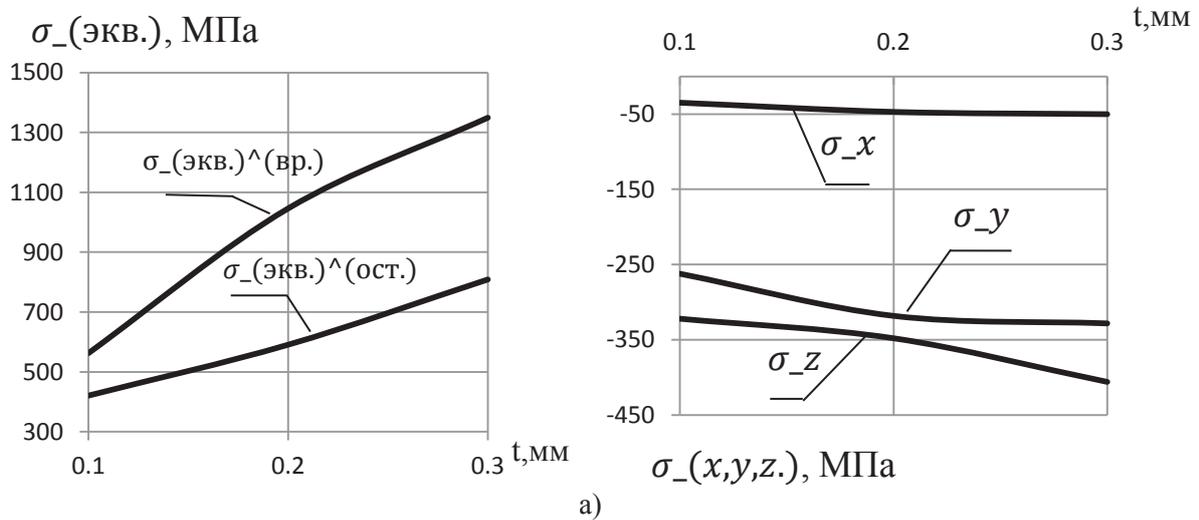


Рис. 6. Влияние глубины внедрения двухрадиусного ролика на максимальные значения эквивалентных временных и остаточных напряжений (а) и компонент максимальных остаточных напряжений (б) образца ($n_1 = 1200$ об/мин., $n_2 = 100$ об/мин., $s = 0,2$ мм/об)

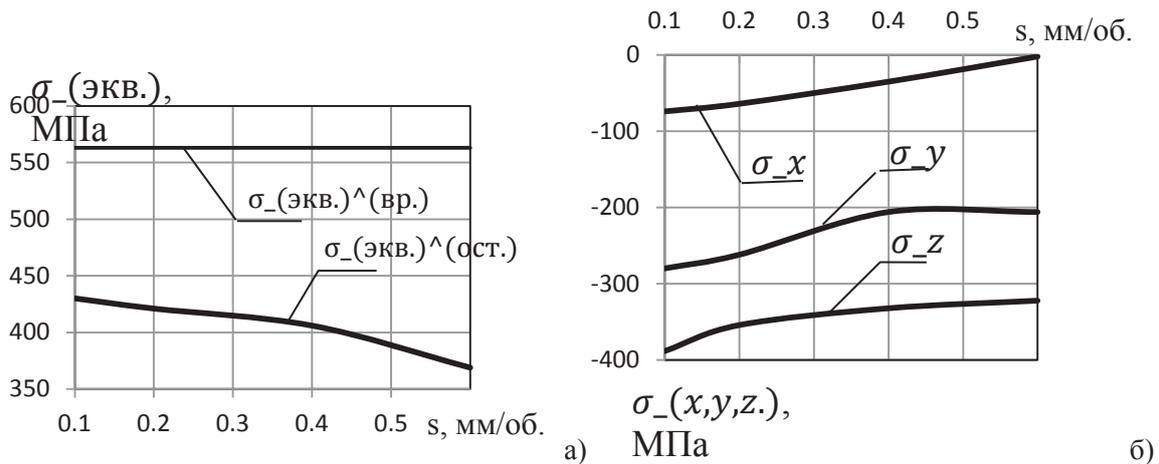


Рис. 7. Влияние величины подачи двухрадиусного ролика на максимальные значения эквивалентных временных и остаточных напряжений (а) и компонент максимальных остаточных напряжений (б) образца ($n_1 = 1200$ об/мин., $n_2 = 100$ об/мин., $t = 0.1$ мм)

На рис. 8 показано влияние частоты вращения двухрадиусного ролика на максимальные значения остаточных напряжений образца при разных частотах его вращения. Повышение скорости деформации приводит к увеличению сопротивления металлов деформированию, что объясняется резким возрастанием скорости перемещения дислокаций, вызывающим, в свою очередь, увеличение сопротивления кристаллической решетки этому перемещению.

Проведенные исследования показывают, что разработанная конструкция профиля рабочей части обкатного ролика и новая кинематика его движения позволяют накапливать большие значения деформаций и увеличить значения параметров механического состояния металла поверхностного слоя при обработке поверхностным пластическим деформированием по сравнению с традиционными способами локального упрочнения.

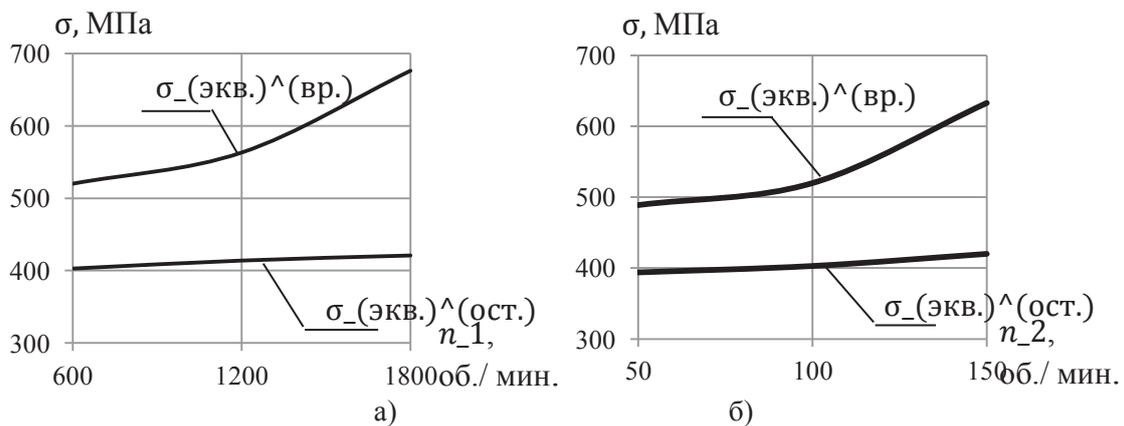


Рис. 8. Влияние частоты вращения двухрадиусного ролика n_1 и детали n_2 на максимальные значения эквивалентных временных и остаточных напряжений образца (а - $n_2 = 100$ об/мин, б - $n_1 = 600$ об/мин, $t = 0,1$ мм, $s = 0,2$ мм/об)

Выводы

1. Условие контакта и характер взаимодействия деформирующего инструмента с деталью в процессе обработки оказывает большое влияние на перераспределение материала поверхностного слоя. Выявлено, что основными факторами, оказывающим влияние на напряженно-деформированное состояние деталей являются геометрия, форма, взаимное расположение элементов деформирующего инструмента и их кинематика относительно обрабатываемой детали.

2. Проведенные исследования показывают, что описанная выше конструкция профиля рабочей части обкатного ролика позволяет увеличить значения эквивалентных остаточных напряжений в 1,2 – 1,4 раза. Установлены расстояние между центрами пластических отпечатков, величина внедрения, подача и частоты вращения детали и рабочего инструмента, при которых формируются наибольшие значения эквивалентных временных и остаточных напряжений.

Список литературы

1. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
2. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
3. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение, 2007. 399 с.
4. Зайдес С.А., Емельянов В.Н., Попов М.Е. Деформирующая обработка валов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. 452 с.
5. Приходько В.М., Петрова Л.Г., Чудина О.В. Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий. М.: Машиностроение, 2003. 384 с.
6. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1983, 352 с.
7. Андрианов А.И. Прогрессивные методы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1975. 240 с.
8. Букатый А.С. Повышение точности изготовления ответственных деталей двигателей средствами статического и динамического моделирования. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 16, № 6 (2), 2014. с. 374 – 377.
9. Поляк М.С. Технология упрочнения - Т. 2. М.: Машиностроение, 1995. 688 с.
10. Зайдес С.А., Нго Као Кыонг Современный подход к определению напряженного состояния в очаге деформации при локальном нагружении. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 7. С. 56 – 63.

**EVALUATION OF THE STRESS STATE UNDER LOCAL LOADING OF CYLINDRICAL BODY
IN DYNAMIC MODELING CONDITION**

Ngo Cao Cuong, Postgraduate, e – mail: cuong.istu@gmail.com

Zaides Semen Azikovich, D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: zsa@istu.edu

Irkutsk national research technical university, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation.

Abstract

The mathematical model of hardening process is built based on the small elastic deformation theory and the finite element method, which allows to determine the stress state depending on the shape and the kinematics of the indenter. Considering the influences of different deformations of schemes on the stress state: skiving burnishing, roller burnishing and rollers burnishing, which have diametrical axis rotation. It is shown that the main factors, which influences to the strain-stress state: geometry, shape, the kinematics and the relative position of the elements of the deforming tool. Using the developed scheme hardening is possible to achieve a high degree of surface hardening plastic deformation as compared to conventional methods.

Keywords: finite element modeling, the intensification of deformation, stress state, plastic deformation, hardening, indenter.

УДК 621.787.4

**ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ОБЖАТИЯ НА
НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ОБКАТКИ ПЛОСКИМИ ПЛИТАМИ**

*ЗАЙДЕС С. А., доктор техн. наук., профессор,
ФАМ ДАК ФЫОНГ, аспирант
(ИрННТУ, г. Иркутск, Россия)*

Зайдес С.А. – 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
е – mail: zsa@istu.edu

Аннотация

Для деформационного упрочнения деталей типа осей, пальцев, втулок предложен способ поверхностного пластического деформирования, основанный на обкатке заготовки плоскими плитами. Способ позволяет обрабатывать детали, которые не имеют центровых отверстий. При поперечной обкатке исключается также изгиб заготовки от действия поперечных сил нагружения. С помощью программного комплекса ANSYS рассмотрено изменение напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей при поперечной обкатке. Определены пластическая и упругая деформации цилиндра после разгрузки. Получено распределение остаточных напряжений по сечению цилиндра в плоскости вертикального нагружения. Оценено напряженное состояние образцов, обкатанных плоскими плитами, по эквивалентным напряжениям. Определена рациональная величина обжатия при поперечной обкатке, используемой в качестве основного параметра поверхностного пластического деформирования.

Ключевые слова: упрочнение, поперечная обкатка, относительное обжатие, напряженно – деформированное состояние, упругопластическая деформация, цилиндр.

Введение

Решающую роль в обеспечении высокой надежности практически любых деталей играют поверхностные и подповерхностные слои, являющиеся по условиям работы наиболее нагруженными и поэтому самыми ответственными зонами. В этих слоях сосредоточено наибольшее количество дефектов, там во время эксплуатации зарождаются и развиваются микротрещины, наиболее интенсивно протекают процессы разупрочнения, изнашивания, отслаивания, окисления и т.п., происходит перераспределение остаточных напряжений, что негативно сказывается на работоспособности деталей и узлов машин [1 - 3].

Хорошо известно [4 - 6], что применение поверхностного пластического деформирования (ППД) позволяет эффективно влиять на эксплуатационную надежность широкой номенклатуры деталей машин, работающих в условиях циклических нагрузок, трения, воздействия коррозионных сред и имеющих концентраторы напряжений, места посадок с гарантированным натягом. В процессе ППД поверхностный слой претерпевает качественные изменения: сглаживаются микронеровности, повышается твердость и прочность материала, образуются остаточные напряжения сжатия, которые оказывают доминирующее влияние на циклическую прочность деталей.

Для деформационного упрочнения деталей типа осей, пальцев, втулок в работе [7] предложен перспективный способ поверхностного пластического деформирования, основанный на обкатке заготовок плоскими плитами. Предложенный способ позволяет обрабатывать цилиндрические детали, которые не имеют центральных отверстий. При поперечной обкатке исключается также изгиб заготовок от действия поперечных сил нагружения.

Цель данной работе заключается в определении напряженно – деформированного состояния цилиндрических деталей при поперечной обкатке плоскими плитами.

Методика экспериментального исследования

Расчет выполнен с помощью прикладной программы ANSYS [8, 9], которая предназначена для математического моделирования различных физических процессов, используя метод конечных элементов. Моделирование процесса поперечной обкатки в программе ANSYS позволяет определить все необходимые параметры: напряженно-деформированное состояние заготовки и инструмента в любой точке и в любой момент времени, что необходимо при разработке оптимального технологического процесса и для глубокого анализа и понимания процессов, происходящих в заготовке при пластическом течении материала.

Схема процесса поперечной обкатки плоскими плитами представлена на рис. 1. При поперечной обкатке инструменты имеют вид плоских плит с малым углом заходной части α_1 , обеспечивающей захват заготовки. Малый угол α_2 в выходной части инструмента служит для уменьшения концентрации напряжения при выходе детали из зоны обработки. Для процесса поперечной обкатки основным параметром режима обработки является степень относительного обжатия Q .

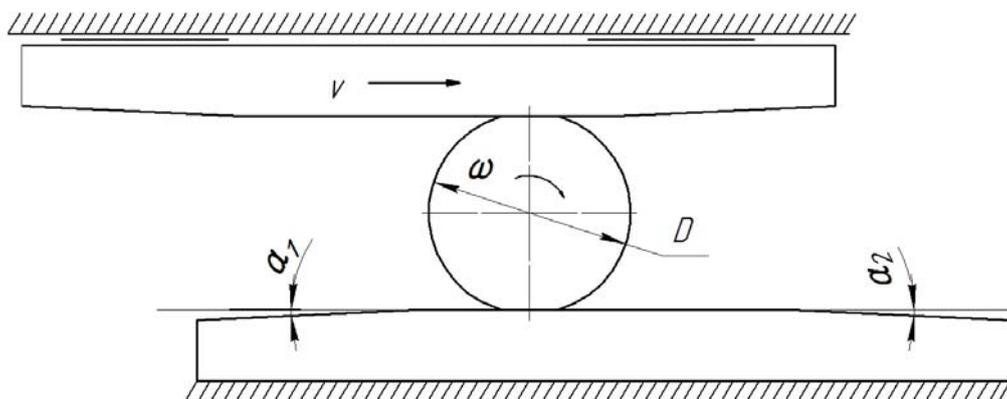


Рис. 1. Схема процесса поперечной обкатки цилиндрической заготовки плоскими плитами

Для проведения расчета в программе ANSYS были построены геометрические модели в виде цилиндра и двух плит. Конечно – элементная модель схемы нагружения цилиндра представлена на рис. 2. Были приняты следующие параметры моделирования: цилиндр диаметром 10 мм и длиной 20 мм из стали Ст45 ($\sigma_r = 360$ МПа); рабочие плиты размерами 3x22x35 мм считаются абсолютно жесткими; величина абсолютного обжатия равна 0,05 мм ($Q=1\%$).

В схеме на рис. 2 нижняя плита неподвижна, верхняя плита опускается вниз до значения величины абсолютного обжатия, после этого верхняя плита перемещается вправо до перемещения заготовки на один оборот, то есть обработка проходила по всему периметру цилиндра. Затем верхняя плита поднимается для полной разгрузки заготовки.

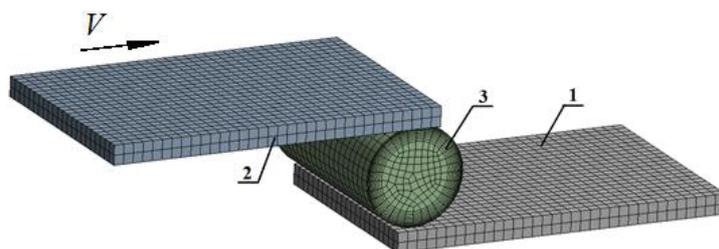


Рис. 2. Конечно – элементная модель процесса поперечной обкатки плоскими плитами:

1 – неподвижная плита, 2 – подвижная плита, 3 – заготовка

Результаты и обсуждение

Напряженно – деформированное состояние цилиндра после поперечной обкатки плоскими плитами. Распределение полей остаточных напряжений в поперечном сечении цилиндра показано на рис. 3. Из рисунка хорошо видна осесимметричность распределения компонентов остаточных напряжений по сечению цилиндра.

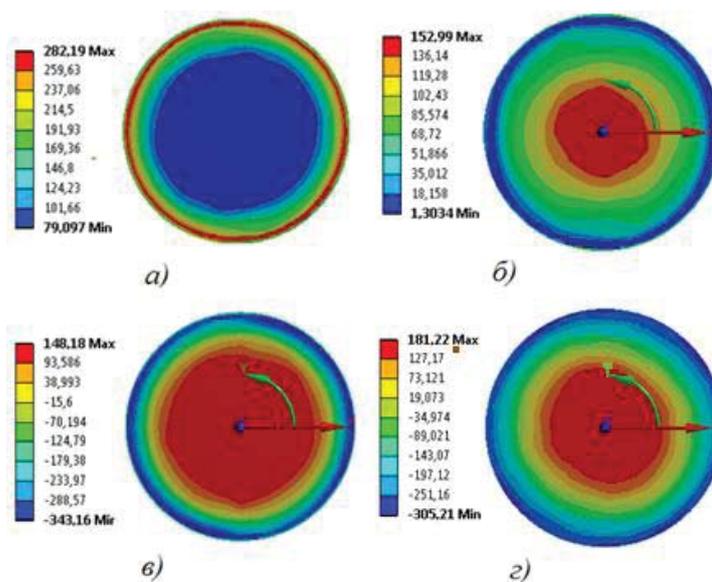


Рис. 3. Поля распределения остаточных напряжений в поперечном сечении цилиндра диаметром 10 мм при относительном обжатии 1 %: а - $\sigma_{\text{экв}}$, б - σ_r , в - σ_θ , г - σ_z

На рис. 4 более подробно показано распределение остаточных напряжений по сечению цилиндра после поперечной обкатки. Радиальные остаточные напряжения σ_r по сечению цилиндра являются растягивающими и монотонно возрастают от поверхности цилиндра к его центру. Распределение тангенциальных σ_θ и осевых остаточных σ_z напряжений носит знакопеременный характер. Для них максимальные напряжения сжатия наблюдаются на некоторой глубине от периферии, а максимальные напряжения растяжения формируются в центральной зоне цилиндра.

Эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ непрерывно увеличивается от центра до подповерхностных слоев, а далее немного понижается на поверхности цилиндра. Данная схема остаточных напряжений в цилиндре является благоприятной с точки зрения эксплуатационных характеристик валов так как она способствует значительному повышению предела выносливости вала. В работе [10] представлены результаты измерения остаточных напряжений на поверхности деталей упрочненных поперечной обкаткой. Остаточные напряжения оценивали методом рентгеноструктурного анализа напряжений с помощью прибора XStressG3/G3R. При относительном обжатии $Q = 1\%$ на поверхности цилиндрической детали диаметром 10 мм тангенциальное остаточное напряжение составляет -270 МПа, а осевое остаточное напряжение -207 МПа. Данные результаты измерения хорошо согласуются с результатами расчета в программе ANSYS. Чтобы оценить уровень изменения диаметра цилиндра по сравнению с абсолютной величиной обжатия приводится показатель доли пластической деформации. Доля пластической деформации δ считается как отношение пластической деформации к абсолютному обжатию в процентах ($\delta = \frac{\Delta D}{\Delta H} \times 100\%$). Диаметр цилиндра после поперечной обкатки с абсолютным обжатием 0,05 мм уменьшается на 10 мкм, что соответствует доли пластической деформации $\delta = 20\%$. Это значит, большая часть абсолютного обжатия идет на упругую деформацию металла центральной зоны цилиндра.

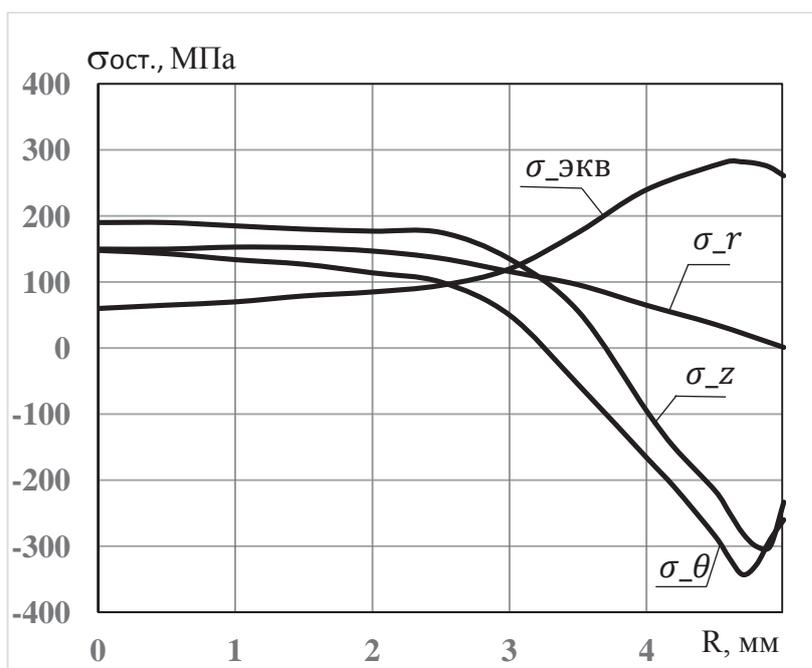


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений по сечению цилиндрических образцов после поперечной обкатки

Влияние диаметра цилиндра на напряженно – деформированное состояния цилиндрических образцов после поперечной обкатки. Чтобы оценить влияния масштабного фактора при поперечной обкатки необходимо сопоставить напряженно-деформированное состояние разных цилиндров при одинаковом относительном обжатии Q .

Опыты проведены для цилиндров различных диаметров с относительным обжатием $Q = 1\%$. Для исключения влияния краевого эффекта длина цилиндров также принята равной двойному диаметру ($l = 2D$).

Максимальные остаточные напряжения и пластическая радиальная деформация для цилиндров разных диаметров при одинаковом относительном обжатии представлены в таблице. В таблице схожие значения остаточных напряжений и доли пластической деформации являются свидетельством того, что при поперечной обкатке можно определить напряженно-деформированное состояние цилиндров по заданному относительному обжатию. Тогда зависимость остаточных напряжений и деформаций от относительного обжатия для цилиндра конкретного диаметра будет справедлива для цилиндров других размеров.

Остаточные напряжения и пластическая радиальная деформация в зависимости от диаметра цилиндров

| Диаметр цилиндра, мм | σ_r , МПа | | σ_θ , МПа | | σ_z , МПа | | $\sigma_{э\text{кв}}$, МПа | | ΔD , мкм | δ , % |
|----------------------|------------------|-------|-----------------------|------|------------------|------|-----------------------------|------|------------------|--------------|
| | Мак. | Мин. | Мак. | Мин. | Мак. | Мин. | Мак. | Мин. | | |
| 10 | 153 | 1,3 | 148 | -343 | 181 | -305 | 282 | 79 | 10,0 | 20,00 |
| 20 | 160 | -0,16 | 150 | -340 | 190 | -310 | 287 | 80 | 19,8 | 19,85 |
| 40 | 158 | 2,5 | 153 | -337 | 186 | -303 | 280 | 77 | 39,6 | 19,79 |
| 60 | 156 | -0,35 | 147 | -344 | 185 | -300 | 285 | 75 | 59,8 | 19,93 |

Влияние степени относительного обжатия на напряженно – деформированное состояние цилиндрических образцов после поперечной обкатки. Подобные расчеты повторно проведены для того, чтобы оценить напряженно-деформированное состояние цилиндра после поперечной обкатки при различных величинах обжатия цилиндра диаметром 10 мм.

Зависимость максимальных остаточных напряжений и доли пластической деформации от степени относительного обжатия показана на рис. 5. С увеличением относительного обжатия доля пластической деформации монотонно повышается. Остаточные растягивающие радиальные напряжения в центральной зоне цилиндра достигают большого значения по сравнению с пределом текучести. При относительном обжатии $Q = 2\%$ максимальное растягивающее радиальное напряжение составляет примерно 72 % от σ_r . При относительном обжатии Q меньше 0,6 % наблюдаются малая доля пластической деформации и малые эквивалентные напряжения. При дальнейшем увеличении Q до 1,6 % доля пластической деформации и эквивалентные напряжения быстро возрастают и затем увеличиваются в небольшой степени. При этом компоненты растягивающих радиальных напряжений в центре цилиндра монотонно повышаются. Поэтому с целью формирования благоприятной схемы остаточных напряжений оптимальное значение относительного обжатия для поперечной обкатки находится в диапазоне 0,8 – 1,6 %. Оптимальное значение относительного обжатия составляет около 1 %. При данном относительном обжатии максимальное напряжение сжатия у поверхности достигает – 343 МПа и максимальное напряжение растяжения в центре цилиндра составляет 181 МПа.

Глубина упрочнения относится к основным характеристикам качества поверхностного пластического деформирования. На рис. 6 показана радиальная пластическая деформация по радиусу детали при обкатке цилиндра с относительным обжатием $Q = 1\%$. По этому рисунку можно определить толщину пластически деформированного слоя детали h . Эту толщину можно принять за глубину упрочненного слоя. Зависимость глубины h от относительного обжатия показана на рис. 7. С увеличением относительного обжатия глубина упрочненного слоя возрастает.

На рис. 7 также показан результат определения глубины упрочненного слоя путем измерения микротвердости по поперечному сечению упрочненных деталей [10]. Результат измерения глубины упрочненного слоя на 10 – 13 % меньше тем при расчете по компьютерной программе. Это обстоятельство объясняется тем, что зона заметного увеличения микротвердости материала всегда меньше, чем зона пластической деформации. Поэтому к результату определения глубины упрочненного слоя на программе необходимо снять 10 – 15 % значения, чтобы получить более корректный результат.

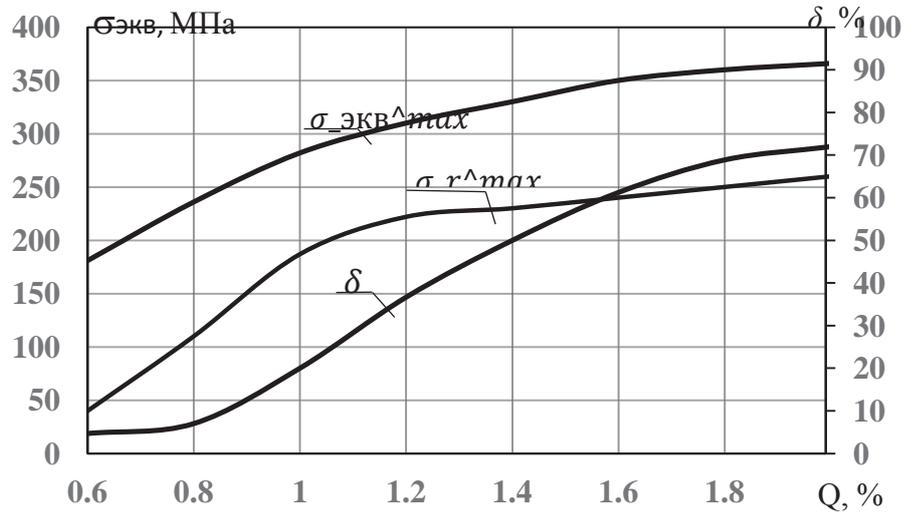


Рис. 5. Зависимость максимальных остаточных напряжений и пластической деформации (δ) цилиндра от степени относительного обжатия:
 δ – доля пластической деформации, $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}$ – максимальные эквивалентные напряжения, σ_r^{max} – максимальные растягивающие радиальное напряжения

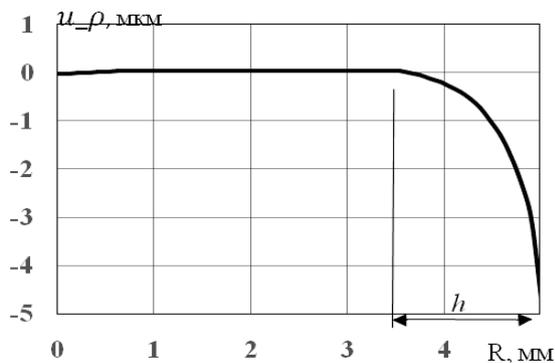


Рис. 6. Радиальная пластическая деформация по радиусу детали (при $Q=1\%$)

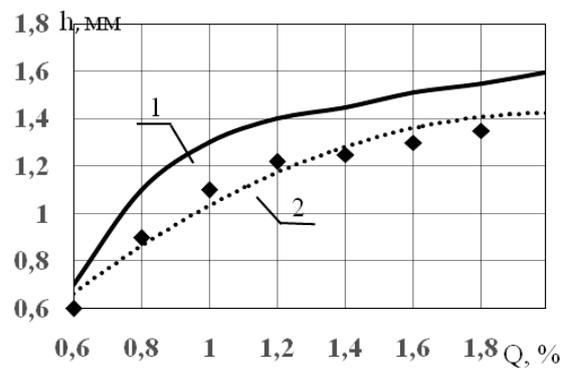


Рис. 7. Зависимость глубины упрочненного слоя от относительного обжатия
 1 – результат расчета в программе ANSYS,
 2 – результат измерения на практике

Выводы

С помощью программы ANSYS рассмотрено напряженно – деформированного состояния цилиндрических деталей при поперечной обкатке плоскими плитами. Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие выводы:

1. Установлена благоприятная схема остаточных напряжений деталей упрочненных поперечной обкаткой. Радиальные остаточные напряжения по сечению цилиндра являются растягивающими и монотонно возрастают от поверхности цилиндра к его центру. Распределение тангенциальных и осевых остаточных напряжений носит знакопеременный характер. Максимальные напряжения сжатия наблюдаются на некоторой глубине от периферии, а максимальные напряжения растяжения наблюдаются в центральной зоне цилиндра.

2. При одинаковом относительном обжатии Q цилиндрические детали разных диаметров после поперечной обкатки плоскими плитами находятся в одинаковом напряженно-деформированном состоянии.

3. увеличением относительного обжатия остаточные растягивающие радиальные напряжения в центральной зоне цилиндра монотонно увеличиваются. По этой причине при поперечной обкатке плоскими плитами необходимо выбирать рациональную величину обжатия, чтобы исключить возможность образования трещин в центральной зоне цилиндрических деталей.

4. Установлено рациональное значение относительного обжатия при поперечной обкатке, используемой в качестве способа поверхностного пластического деформирования. При обкатке сплошного цилиндра рациональный диапазон значения относительного обжатия находится в пределах 0,8 – 1,6 %.

Список литературы

1. Одинцов Л. Г., Плешаков В. В. Технологическое обеспечение качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин алмазным выглаживанием // Научные технологии в машиностроении. – 2013. № 1. – С. 41 – 48.
2. Сулов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 318 с.
3. Балтер М. А. Упрочнение деталей машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 184 с.
4. Чепан П. А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным деформированием. – Минск: Наука и техника, 1981. – 128 с.
5. Отений Я. Н. Технологическое обеспечение качества деталей машин поверхностным пластическим деформированием: монография. Политех-ник Волгоград, 2005. – 224 с.
6. Зайдес С.А., Забродин В.А., Мураткин Г.В. Поверхностное пластическое деформирование. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 404 с.
7. Фам Дак Фыонг, Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан. Определение условий поперечной обкатки при поверхностном пластическом деформировании // Вестник ИрГТУ. – 2015. № 4. – С. 48 – 52.
8. Бруйка В. А., Фокин В. Г., Солдусова Е. А., Глазунова Н. А., Адеянов И. Е. Инженерный анализ в Ansys Workbench. Часть 1. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.
9. Chen Xiaolin, Liu Yijun. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. : CRC Press, 2014. – 411 p.
10. Зайдес С.А., Фам Дак Фыонг. Оценка качества цилиндрических деталей после поперечной обкатки плоскими плитами // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации) Материалы докладов VI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. 2016. – С. 74 – 85.

**INFLUENCE OF PERCENTAGE REDUCTION ON STRESS-STRAIN STATE
OF CYLINDRICAL PARTS UNDER TRANSVERSE BURNISHING**

Zaydes S.A., D. Sc. (Engineering), Professor, e – mail: zsa@istu.edu

Pham Dac Phuong, postgraduate student, e – mail: dacphuong.ru88@gmail.ru

Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

Abstract

A method of surface plastic deformation based on work piece burnishing with flat plates is proposed for mechanical hardening of axles, fingers, bushings etc. The method allows to machine parts that do not have center holes. Transverse burnishing also eliminates the work piece bend caused by the action of shear loading forces. With the help of ANSYS software the change in the stress-strain state of cylindrical parts is considered depending on the value of reduction. Plastic and elastic deformation of the cylinder after load relief are determined. The distribution of residual stresses in the cross section of the cylinder in the plane of vertical load is obtained. The stress state of the samples subjected to is estimated by the equivalent stresses. The rational value of reduction under transverse burnishing used as the basic parameter of surface plastic deformation is determined.

Keywords: strengthening; transverse burnishing; percentage reduction; stress-strain state; elastic-plastic deformation, cylinder.

УДК 621.789

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО
ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ
20 ПОСЛЕ ЦЕМЕНТАЦИИ И ЗАКАЛКИ В УСЛОВИЯХ
ЭЛЕКТРОЛИТНО – ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА**

*РАХИМЯНОВ Х. М., доктор техн. наук, профессор,
РАХИМЯНОВ К. Х., канд. техн. наук, доцент,
ЕРЕМИНА А. С., ст. преподаватель,
АНИЩЕНКО О.И., магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Рахимьянов Х.М. – 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: x.raximyanov@corp.nstu.ru

Аннотация

Показана эффективность использования ультразвукового пластического деформирования поверхностного слоя стали 20 после цементации и закалки в условиях электролитно-плазменного нагрева. На основании проведения экспериментальных исследований с использованием математического планирования получено уравнение регрессии, устанавливающее взаимосвязь микротвердости и режимных параметров ультразвукового пластического деформирования – скорости, подачи и статического усилия. Установлено, что использование ультразвукового пластического деформирования в формировании поверхностного слоя после химико-термической обработки в электролитной плазме позволило повысить значение микротвердости с 6000 МПа до 8000 МПа, а также сформировать на поверхности специфичный регулярный микрорельеф. Проведена оптимизация режимных параметров ультразвукового пластического деформирования, обеспечивающего максимальный прирост микротвердости.

Ключевые слова: ультразвуковое пластическое деформирование, микротвердость, микрорельеф, цементация, математическое планирование.

Введение

Повышение прочностных характеристик поверхностного слоя деталей машин и инструментов является важной задачей на пути обеспечения их надежности и долговечности при эксплуатации. Известно, что надежность и долговечность деталей машин при эксплуатации в условиях трения во многом определяется такими характеристиками качества поверхностного слоя как микротвердость и микрогеометрия поверхности.

В настоящее время существует значительный арсенал технологических методов формирования высокопрочного состояния поверхностного слоя, в том числе комбинированных, основанных на сочетании термических и деформационных процессов в одной обработке [1 – 3]. Перспективным для достижения высоких характеристик качества поверхностного слоя деталей машин и инструментов представляется использование химико-термической обработки, в частности, цементации в электролитной плазме [4] и ультразвукового пластического деформирования (УЗПД) [5 – 8].

Данная комбинация процессов интересна тем, что при использовании в качестве материала детали низкоуглеродистой стали, возможно на первом этапе обработки за счет цементации и закалки в электролитной плазме получить высокопрочное состояние материала в пределах поверхностного слоя, соответствующее закаленным высокоуглеродистым структурам, а затем с помощью УЗПД реализовать механизмы деформационного упрочнения. Несмотря на то, что механизмы, задействованные в упрочнении, для комбинируемых обработок различаются, объемы материала поверхностного слоя, в которых они реализуются, находятся примерно на одном масштабном уровне.

Так в исследованиях работы [9] показано, что при цементации стали 20 в электролитной плазме возможно формирование высокопрочного поверхностного слоя толщиной до 200 мкм. При этом максимальное значение микротвердости в пределах поверхностного слоя достигало 9000 – 9300 МПа, тогда как на поверхности ее значение составляло только 6000 МПа. Снижение микротвердости в верхней части поверхностного слоя объясняется наличием остаточного аустенита в этой зоне и является характерным при закалке структур с высоким содержанием углерода, а с другой – процессами самоотпуска при охлаждении в проточном электролите. Результаты исследований теоретического и экспериментального характера [1, 10 – 12] свидетельствуют о том, что очаг распространения пластической деформации при УЗПД закаленных структур составляет 0,2 – 0,25 мм. Использование ультразвукового пластического деформирования после электролитно-плазменной цементации и закалки, направленное на реализацию механизмов деформационного упрочнения закаленных структур и структурно-фазовых превращений (снижение доли остаточного аустенита вблизи поверхности), реализует выполнение еще одной задачи в обеспечении качества поверхностного слоя – формирования специфичного маслоудерживающего микрорельефа на поверхности, что является благоприятным фактором при эксплуатации в условиях полужидкостного трения.

Целью настоящего исследования является оптимизация режимных параметров ультразвукового пластического деформирования поверхностного слоя стали 20, сформированного в условиях электролитно-плазменной цементации и закалки.

Для использования полученных результатов экспериментальных исследований в обработке деталей рассматриваемым комбинированным технологическим методом необходимо выявить взаимосвязь основных показателей процесса с параметрами технологических режимов обработки.

Теория

Как известно, методы математического планирования используются как инструмент, позволяющий существенно сократить число опытов, а также установить взаимосвязь между параметром оптимизации и технологическими режимами обработки. К переменным факторам и исследуемым параметрам предъявляются определенные требования. В частности, факторы должны быть управляемыми, совместимыми, независимыми и оказывать непосредственное воздействие на исследуемый параметр.

Параметры оптимизации должны быть универсальны, иметь физический смысл, быть воспроизводимыми и количественно выражаться. Так для операции ультразвукового пластического деформирования в качестве параметра оптимизации целесообразно выбрать микротвердость материала поверхностного слоя, так как данный параметр оценивает эффективность процесса и имеет ясный физический смысл.

Введение ультразвукового пластического деформирования после электролитно-плазменного упрочнения направлено на достижение нескольких эффектов. Во-первых, УЗПД позволяет дополнительно упрочнить поверхностный слой, закаленный ранее на предшествующей операции химико-термической обработки, что обеспечивает повышение микротвердости поверхностного слоя.

Во-вторых, при ультразвуковом деформационном воздействии на поверхности формируется регулярный маслостойкий микрорельеф, ответственный за реализацию отделочного эффекта, при этом снижая уровень шероховатости поверхности от предшествующей обработки.

Известно, что динамические параметры ультразвукового воздействия определяются амплитудой, частотой и статическим усилием, которые ответственны за образование на обрабатываемой поверхности пластических отпечатков определенного размера. С точки зрения управления деформационным процессом при УЗПД наиболее удобным режимным параметром является статическое усилие. Выбор оптимального значения $P_{ст}$ обуславливается необходимостью создания пластического отпечатка на обрабатываемой поверхности определенного размера. Так в случае УЗПД закаленной стали 20 со значениями исходной микротвердости 6000 МПа при достижении максимального упрочняющего эффекта диаметр пластического отпечатка $d_{опт}$ составляет $\sim 0,2$ мм [7].

В виду того, что сущность ультразвуковой обработки заключается в дробном (порционном) деформационном воздействии на обрабатываемую поверхность, в результате которого на ней образуются отдельные единичные отпечатки, то для реализации данной технологии упрочнения конкретных деталей необходимо нанесение на обрабатываемую поверхность серии таких отпечатков с соответствующим пространственным распределением.

Так, при обработке цилиндрических деталей пространственное распределение отпечатков обеспечивается приданием детали кинематических движений – вращения вокруг собственной оси (V) и продольного перемещения (S).

Стоит отметить, что необходимое распределение пластических отпечатков по обрабатываемой поверхности обуславливается определением оптимального коэффициента перекрытия отпечатков k , значение которого должны быть менее 1.

Величина данного коэффициента определяет кратность деформационного воздействия на элементарный объем материала. Так, назначение заниженных значений отмеченных кинематических параметров при ультразвуковом пластическом деформировании не позволит обеспечить оптимальный коэффициент перекрытия отдельных отпечатков. При этом на поверхности детали единичные отпечатки будут чрезмерно плотно накладываться друг на друга, что вызовет переупрочнение материала поверхностного слоя. С другой стороны, использование завышенных значений V и S приведет к появлению недоупрочненных зон между отпечатками, обуславливающих снижение микротвердости материала поверхностного слоя.

Следовательно, для достижения необходимых упрочняющего и отделочного эффектов при ультразвуковом пластическом деформировании необходим подбор оптимальных значений режимных параметров данной обработки – V , S и $P_{ст}$.

Исходя из данных соображений и результатов предварительных экспериментальных исследований, были определены интервалы варьирования переменных факторов.

Влияние указанных факторов – статического усилия, скорости и подачи на реализацию процесса ультразвукового пластического деформирования подтверждается результатами проведенных экспериментальных исследований.

При планировании эксперимента в качестве модели был выбран полином 2-го порядка:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^k b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

При анализе уравнения регрессии были учтены только статистически значимые коэффициенты, определяемые по формулам, указанным в работе [13]. Статистическая значимость коэффициентов была оценена при помощи критерия Стьюдента.

Проверка уравнения регрессии на адекватность экспериментальным результатам осуществлялось по критерию Фишера при 5% уровне значимости [14].

Принятые уровни варьирования переменных факторов представлены в таблице.

В соответствии с установленными уровнями варьирования была составлена матрица планирования экспериментальных исследований по оптимизации ультразвукового пластического деформирования образцов после электролитно-плазменной цементации и закалки.

По результатам обработки данных экспериментальных исследований было получено уравнение регрессии для расчета параметра оптимизации “ Y ” (микротвердости поверхностного слоя):

$$Y = 8012,71 + 56,68X_1 + 55,57X_2 - 39,07X_3 - 209,14X_1^2 - 198,94X_2^2 - 970,97X_3^2 - 1,25X_1X_2 + 131,25X_1X_3 + 101,25X_2X_3 \quad (2)$$

Уровни варьирования переменных факторов УЗПД

| Уровни варьирования | Переменные | Скорость, V (X_1) | | Подача, S (X_2) | | Статическое усилие, $P_{ст}$ (X_3) | |
|------------------------|------------|-------------------------|-------|-----------------------|-------|--|-----|
| | | код ед. | м/мин | код ед. | мм/об | код ед. | Н |
| Основной | | 0 | 54,16 | 0 | 0,056 | 0 | 90 |
| Нижний | | -1 | 32,97 | -1 | 0,035 | -1 | 49 |
| Верхний | | +1 | 75,36 | +1 | 0,075 | +1 | 131 |
| Нижняя звездная точка | | -1,215 | 28,26 | -1,215 | 0,030 | -1,215 | 40 |
| Верхняя звездная точка | | +1,215 | 84,78 | +1,215 | 0,080 | +1,215 | 140 |
| Интервал варьирования | | - | 42,39 | - | 0,040 | - | 82 |

Анализ уравнения (2) показывает, что на значение микротвердости поверхностного слоя оказывают влияние все задействованные в экспериментах переменные факторы, о чем свидетельствуют значения коэффициентов уравнения регрессии, в число которых вошли только статистически значимые величины.

На основе полученных данных была построена многомерная графическая модель $H\mu = f(S, P_{ст})$, при фиксированном значении V , представленная на рис. 1.

Внешний вид данной графической модели свидетельствует о наличии оптимальных значений переменных факторов, подтверждая правильность выбора диапазона варьирования исследуемых режимных параметров.

Однако, в виду неудобства анализа поверхности отклика в виде многомерной графической модели, соответствующей полученному полиному (2), его графическое отображение целесообразно представить в виде плоских зависимостей $H\mu = f(V)$, $H\mu = f(S)$, $H\mu = f(P_{ст})$, полученных сечением поверхности отклика при фиксированных значениях остальных переменных факторов.

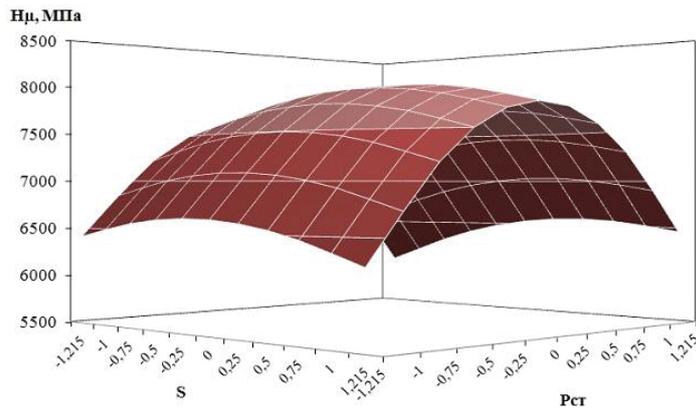


Рис. 1. Зависимость микротвердости поверхностного слоя от подачи (S) и статического усилия ($P_{ст}$) при фиксированном значении скорости ($V = 54,16$ м/мин)

Результаты и обсуждение

Анализ экспериментальных данных (рис. 2) свидетельствует о том, что микротвердость поверхностного слоя увеличивается не во всем исследуемом диапазоне статических усилий. Так, для всех значений скорости обработки увеличение $P_{ст}$ от значений 40 до 90 Н приводит к росту микротвердости до максимальных значений. Данный рост объясняется тем, что повышение статического усилия до отмеченных значений позволяет создавать в поверхностном слое напряжения, обеспечивающие необходимый уровень пластической деформации. Однако, при дальнейшем повышении $P_{ст}$ от 90 до 140 Н происходит существенное снижение микротвердости поверхностного слоя. Данное обстоятельство объясняется невозможностью материала воспринимать повышенные деформационные нагрузки, в результате чего происходит его разупрочнение.

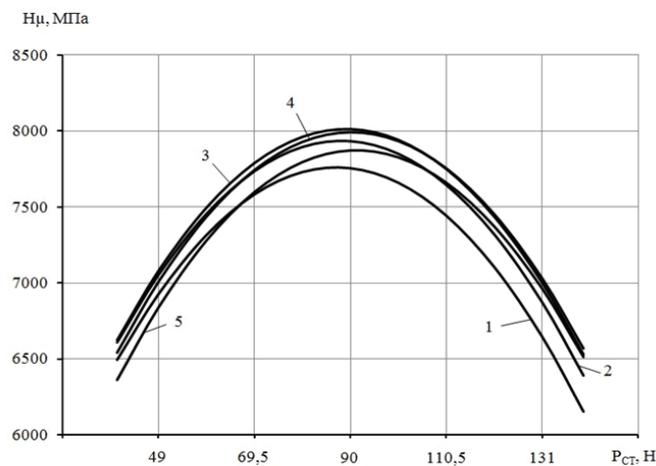


Рис. 2. Зависимость микротвердости поверхностного слоя от $P_{ст}$ при $S = 0,055$ мм/об:
 1 – $V = 32,97$ м/мин; 2 – $V = 43,56$ м/мин; 3 – $V = 54,16$ м/мин;
 4 – $V = 64,76$ м/мин; 5 – $V = 75,36$ м/мин

Результаты исследования влияния скорости вращения детали V на микротвердость поверхностного слоя также подтверждают наличие ее оптимальных значений. Максимальное значение микротвердости при этом также составляет 8012 МПа, что соответствует значению скорости вращения детали $V = 54,16$ м/мин при подаче $S = 0,055$ мм/об (рис. 3, кривая 3). Дальнейшее увеличение V приводит к снижению микротвердости поверхностного слоя, что объясняется возникновением переупрочненных зон вследствие чрезмерно большого числа единичных отпечатков, приходящихся на единицу площади обрабатываемой поверхности.

При рассмотрении влияния величины подачи на значение микротвердости поверхностного слоя наблюдается аналогичная картина. Так, максимальное ее значение достигается назначением величины подачи $S = 0,055$ мм/об (рис. 4, кривая 3). Использование более высоких значений подач также приводит к снижению значения микротвердости. Данная зависимость объясняется образованием неупрочненных зон на поверхности обрабатываемой детали вследствие недостаточного количества отдельных отпечатков на единицу площади поверхности.

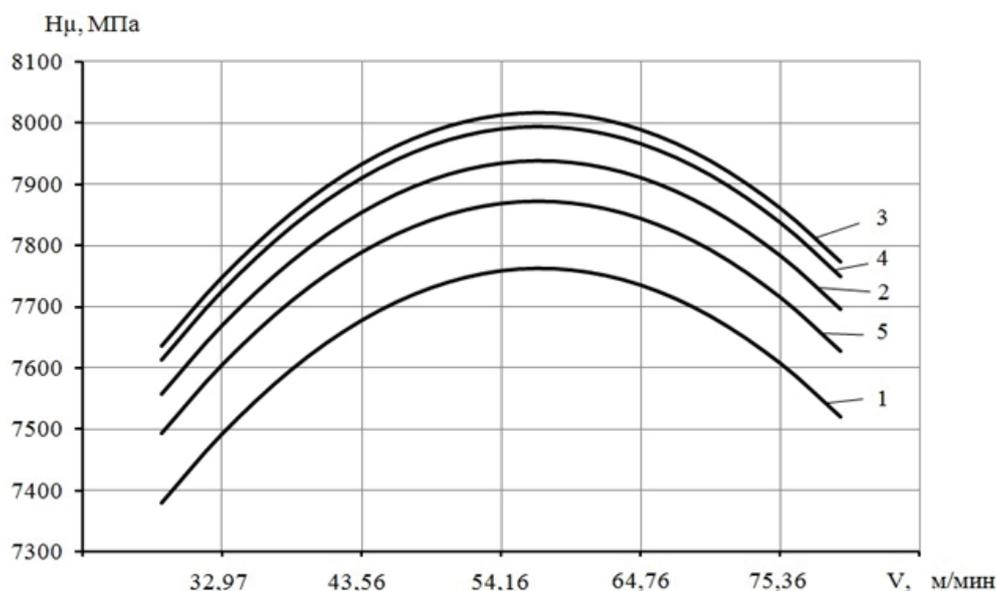


Рис. 3. Зависимость микротвердости поверхностного слоя от скорости вращения V при $P_{cm}=90$ Н:

1 – $S = 0,035$ мм/об; 2 – $S = 0,045$ мм/об; 3 – $S = 0,055$ мм/об; 4 – $S = 0,065$ мм/об;
5 – $S = 0,075$ мм/об

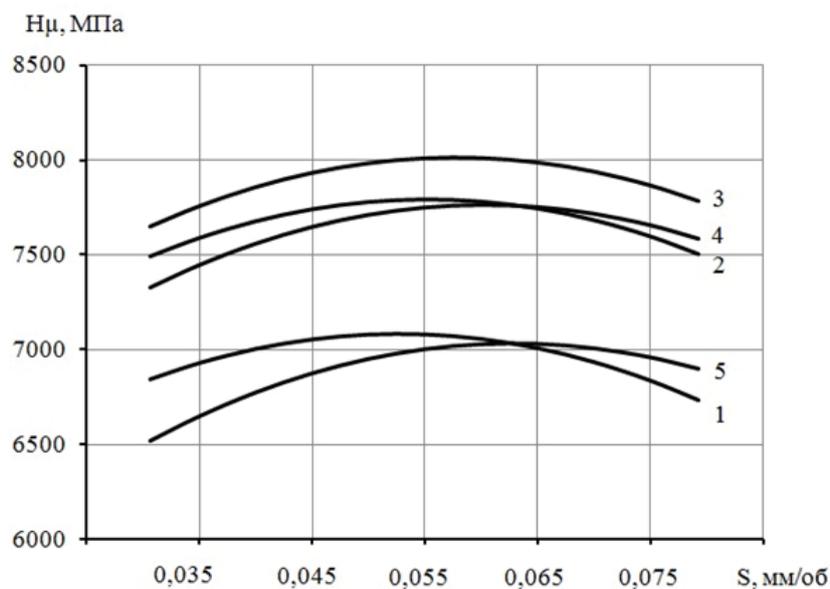


Рис. 4. Зависимость микротвердости поверхностного слоя от подачи S при $V = 54,16$ м/мин:
1 – $P_{ст} = 49$ Н; 2 – $P_{ст} = 69,5$ Н; 3 – $P_{ст} = 90$ Н; 4 – $P_{ст} = 110,5$ Н; 5 – $P_{ст} = 131$ Н

На рис. 5 представлена морфология поверхности после ультразвукового пластического деформирования, подтверждающая формирование на поверхности регулярного микрорельефа.

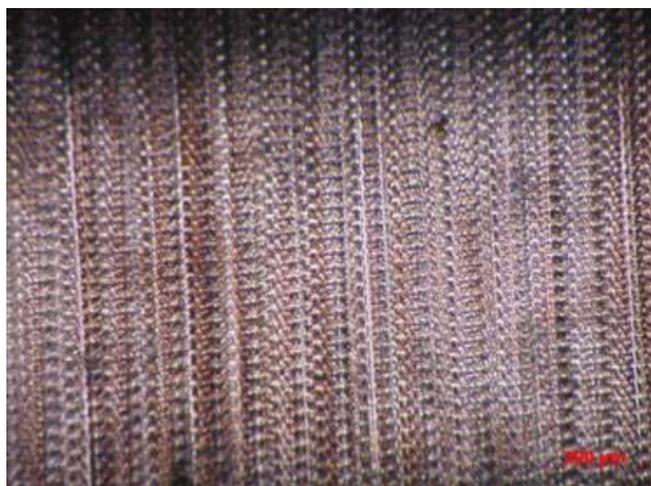


Рис. 5. Микрорельеф поверхности образца после ультразвукового пластического деформирования

Выводы

При помощи методов математического планирования получено уравнение регрессии, позволяющее установить взаимосвязь микротвердости поверхностного слоя с основными технологическими параметрами процесса – статическим усилием, скоростью вращения детали и подачей. Определены оптимальные значения $P_{ст} = 90$ Н, $V = 54,16$ м/мин и $S = 0,055$ мм/об, обеспечивающие максимальное значение микротвердости $H\mu = 8012$ МПа.

Список литературы

1. Рахимьянов Х. М. Теоретические основы комбинирования высокоинтенсивных термических и деформационных процессов в поверхностной обработке: автореф. дис. д-ра техн. наук. Тула, 1998. 40 с.
2. Иванцовский В. В., Рахимьянов Х. М. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин при интеграции поверхностной термической и финишной механической обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – №6. С. 43 – 46.
3. Рахимьянов Х. М., Исхакова Г. А. Поверхностное упрочнение с использованием низкотемпературной плазмы и ультразвука // Электронная обработка материалов – 1990. – №5. С. 9 – 12.
4. Рахимьянов Х. М., Еремина А. С. Цементация низкоуглеродистой стали при нагреве в электролитах // Упрочняющие технологии и покрытия – 2006. – №3 (15). С. 9 – 12.
5. Рахимьянов Х. М., Семенова Ю. С. Формирование морфологии поверхности в процессе ультразвукового пластического деформирования деталей машин // Упрочняющие технологии и покрытия – 2010. – №10 (70). С. 20 – 23.
6. Исупов А. В., Никитин Ю. В., Рахимьянов Х. М. Прогнозирование состояния материала в очаге деформации при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании // Упрочняющие технологии и покрытия – 2005. – №4. С. 41 – 46.
7. Рахимьянов Х. М., Семенова Ю. С. Технологическое обеспечение геометрических параметров качества поверхности при ультразвуковом пластическом деформировании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – №3 (56) С. 33 – 36.
8. Рахимьянов Х. М., Семенова Ю. С., Сауткина М. А., Скрынник В. А., Лихачев А. П. Обеспечение качества поверхности деталей машин ультразвуковым пластическим деформированием перед нанесением покрытия // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – №2 (59). С. 4 – 7.
9. Еремина А. С. Обеспечение упрочняющего и отделочного эффектов на этапах плазменно-электролитной цементации и ультразвукового пластического деформирования // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – №11 (143). С. 27 – 31.
10. Исхакова Г. А., Рахимьянов Х. М. Исследование микроструктуры и механических свойств поверхностного слоя стали 45 после плазменного термоупрочнения // Электронная обработка материалов. – 1987. – №5. С. 24 – 27.
11. Рахимьянов Х. М. Теоретическое исследование процесса ультразвукового пластического деформирования поверхностного слоя металлов и сплавов // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 1998. – №1. С. 105 – 112.
12. Rakhimyanov Kh. M., Rakhimyanov K. Kh., Rakhimyanov A. Kh., Kutyshkin A. V. Techniques for setting modes of thermal and deformation effect at combined hardening and finishing operations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol.7. (VII International Scientific and Practical Conference on Innovations in Mechanical Engineering, ISPCIME 2015). 2016. p.012015.
13. Налимов В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 340 с.

14. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

OPTIMIZATION OF REGIME PARAMETERS OF ULTRASONIC PLASTIC DEFORMATION OF SURFACE LAYER STEEL 20 AFTER CEMENTATION AND THERMOHARDENING DURING ELECTROLYTE – PLASMA HEATING

Rakhimyanov Kh.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: x.raximyanov@corp.nstu.ru

Rakhimyanov K.Kh., C.Sc. (Engineering), Associate Professor, e – mail: raximyanov@corp.nstu.ru

Eremina A.S., Senior lecturer, e – mail: a.eremina@corp.nstu.ru

Anischenko O.I., Master student, e – mail: lesjaani@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstact

The efficiency of ultrasonic plastic deformation of the surface layer of steel 20 after cementation and thermohardening during electrolyte-plasma heating is shown. Based on research using mathematical planning, a regression equation is obtained that establishes the correlation between the microhardness and the regime parameters of ultrasonic plastic deformation – speed, feed and static force. It is established that the use of ultrasonic plastic deformation in the formation of the surface layer after chemical-thermal treatment in electrolyte plasma increased microhardness from 6000 MPa to 8000 MPa, and also formed a specific regular microrelief on the surface. Optimization of the regime parameters of ultrasonic plastic deformation providing maximum microhardness increase is carried out.

Keywords: ultrasonic plastic deformation; microhardness; microrelief; cementation; mathematical planning.

УДК 621.9.047

**ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО РАСТВОРЕНИЯ ПОКРЫТИЯ НА
ОСНОВЕ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ПГ – 10Н – 01**

*ЯНПОЛЬСКИЙ В. В., канд. техн. наук, доцент,
КАДЫРБАЕВ Р. М., аспирант,
ИВАНОВА М. В., аспирант,
ЮСУПОВ А. С., магистрант
(НГТУ г. Новосибирск, Россия)*

Кадырбаев Р.М. – 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: kadyrbaev.2013@corp.nstu.ru

Аннотация

Рассматриваются особенности электрохимического растворения покрытия в водных растворах нейтральных солей NaNO_3 , Na_2SO_4 и NaCl . Приведены поляризационные исследования электрохимического растворения покрытия ПГ–10Н–01 в потенциодинамическом режиме. Представлена схема установки для проведения экспериментальных исследований. Установлено, что растворение покрытия в водном растворе 10 % Na_2SO_4 происходит в активном состоянии до потенциала $\varphi = 9$ В. В растворе 10 % NaCl наблюдаются области пассивации, активации и транспассивации поверхности покрытия. Показано, что растворение покрытия ПГ – 10Н – 01 в 10 % NaNO_3 протекает в активном состоянии до потенциала $\varphi = 8$ В и в пассивном состоянии в области потенциалов потенциала $\varphi = 8..9$ В. Выявленные особенности электрохимического растворения материала позволяет установить значения режимов электроалмазного шлифования деталей с покрытиями.

Ключевые слова: электроалмазная обработка, порошковые покрытия, электрохимическое растворение.

Введение

Порошок ПГ – 10Н – 01 является разновидностью порошков для наплавки, которые применяются с целью нанесения специальных покрытий на поверхности деталей и оборудования, способные противостоять коррозии, высоким температурам, износу и другим неблагоприятным факторам. Довольно часто этот вид никелевых порошков задействуют также и для восстановления и упрочнения инструмента. Нанесение порошка позволяет придать поверхностям стойкость к коррозии и трению, абразивному износу и ряд других важных характеристик.

Существуют различные методы нанесения покрытий, одним из которых является вакуумная электронно-лучевая наплавка. Применение данного метода нанесения покрытия позволяет устранить многие недостатки, присущие распространенным в настоящее время методам дуговой наплавки и наплавки токами высокой частоты [1, 2]. Твердость покрытия ПГ – 10Н – 01, нанесенного вакуумной электронно-лучевой наплавкой достигает 60 HRC, а пористость около 0,3 %.

После наплавки для достижения заданной точности размеров и формы требуется обработка нанесенных покрытий. Одним из возможных методов обработки высокопрочных материалов является электроалмазное шлифование, которое хорошо зарекомендовало себя при обработке твердых сплавов и быстрорежущих сталей, благодаря совмещению процессов

электрохимического растворения обрабатываемого материала с процессами механического резания [3]. Производительность процесса шлифования и качество обработанной поверхности во многом зависят от особенностей электрохимического растворения материала покрытия в выбранных составах электролитов [4, 5]. В связи с этим для эффективного применения электроалмазного шлифования при обработке покрытий на основе порошкового материала ПГ – 10Н – 01 необходимо изучить характер электрохимического растворения покрытия в различных составах электролита.

Методика экспериментальных исследований

Для определения характера электрохимического растворения покрытия ПГ – 10Н – 01 использовался потенциодинамический метод исследования, позволяющий установить зависимость плотности тока от потенциала анода.

Поскольку электроалмазное шлифование производится при напряжениях 10 – 15 В [6], то и развертка потенциала производилась от 0 до 9 В со скоростью 0,1 В/с. Поляризационные исследования проводились на потенциостате Elins P – 20X. Электрохимическая ячейка для исследований представлена на рис. 1.

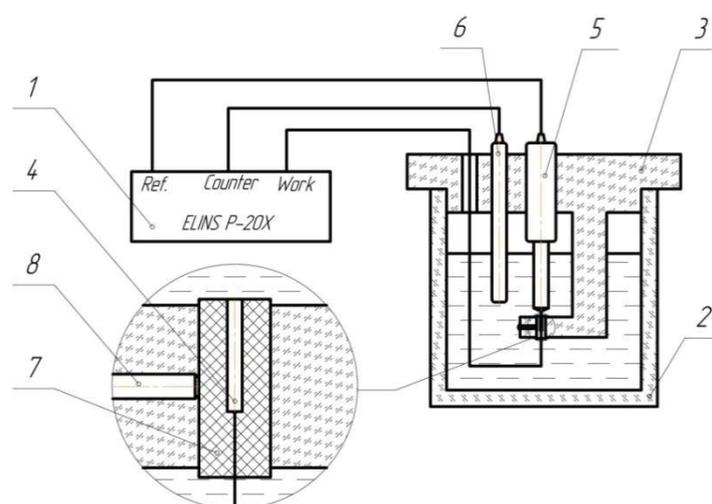


Рис. 1. Схема установки для проведения поляризационных исследований:

- 1 – потенциостат Elins P – 20X; 2 – емкость для электролита;
- 3 – крышка с кронштейном; 4 – рабочий электрод (Work);
- 5 – электрод сравнения (Ref.); 6 – вспомогательный электрод (Counter);
- 7 – эбонитовая оправка; 8 — крепежный винт

В качестве материала электрода сравнения использовалась платина, а вспомогательного электрода – медь.

Образцы для исследований представляют собой пластинки покрытия ПГ – 10Н – 01 площадью в поперечном сечении 1 мм². Образцы устанавливались в эбонитовые оправки и заливались эпоксидной смолой ЭДП – 8 ГОСТ 10587 – 84. Химический состав порошка ПГ – 10Н – 01 представлен в таблице.

Химический состав порошка ПГ – 10Н – 01

| Cr, % | B, % | Si, % | Fe, % | C, % | Ni |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 14 – 20 | 2,8 – 3,4 | 4,0 – 4,5 | 4,0 – 4,5 | 0,6 – 1,0 | основа |

Известно, что особенности электрохимического растворения материала зависят от анионного и катионного состава электролита [7]. Кислотные растворы электролитов обладают высокой электропроводностью, что способствует увеличению скорости растворения стали, однако эти электролиты агрессивно воздействуют на технологическое оборудование и представляют опасность для персонала. Поэтому наибольшее распространение для процесса электроалмазного шлифования получили растворы нейтральных солей. В связи с этим для проведения поляризационных исследований были выбраны следующие водные растворы нейтральных солей: NaCl, NaNO₃ и Na₂SO₄ 10 % концентрации.

Результаты и обсуждения

На рис. 2 – 4 представлены результаты поляризационных исследований электрохимического растворения покрытия ПГ – 10Н – 01 в водных растворах 10 % Na₂SO₄, NaCl и NaNO₃, соответственно.

Как видно из графика (рис. 2), электрохимическое растворение покрытия ПГ – 10Н – 01 в 10 % водном растворе Na₂SO₄ происходит в активном состоянии в диапазоне потенциалов от $\varphi = 0,8$ В до $\varphi = 9$ В. Вероятно, анион SO₄⁻ препятствует образованию окисной пленки на поверхности покрытия, вытесняя кислород до потенциала $\varphi = 0,8$ В электрохимическое растворение практически не наблюдается.

Электрохимическое растворение покрытия ПГ – 10Н – 01 в 10 % водном растворе NaCl (рис. 3) сопровождается областью пассивации поверхности в диапазоне потенциалов от $\varphi = 0$ до $\varphi = 3$ В. Вероятно, это связано с образованием окисной пленки на поверхности рабочего электрода толщиной до 40 Å. Увеличение потенциала анода разрушает окисную пленку и в диапазоне потенциалов $\varphi = 3$ В до $\varphi = 7,5$ В наблюдается увеличение плотности тока, что может свидетельствовать об активном растворении материала. В области потенциалов от $\varphi = 7,5$ В до 9 В вновь наблюдается пассивация поверхности электрода, о чем свидетельствует замедление роста плотности тока.

В 10 % водном растворе NaNO₃ (рис. 4) характер поляризационной кривой аналогичен растворению покрытия в растворе сульфата натрия. До потенциала $\varphi = 1$ В растворение практически не наблюдается. В диапазоне потенциалов от 1 до 8 В происходит активное растворение, что сопровождается значительным ростом плотности тока. Увеличение потенциала анода от 8 В до 9 В приводит к пассивации поверхности и снижению плотности тока.

Для обеспечения геометрической точности при электроалмазной обработке активирующие электролиты нежелательны, так как при этом растравление покрытия будет происходить не только в зоне обработки, но и во всех местах контакта электролита и материала [8].

Основываясь на графиках электрохимического растворения в водных растворах солей хлорида, сульфата и нитрата натрия, для процесса электроалмазного шлифования покрытия на основе порошкового материала ПГ – 10Н – 01 рекомендуется 10% водный раствор.

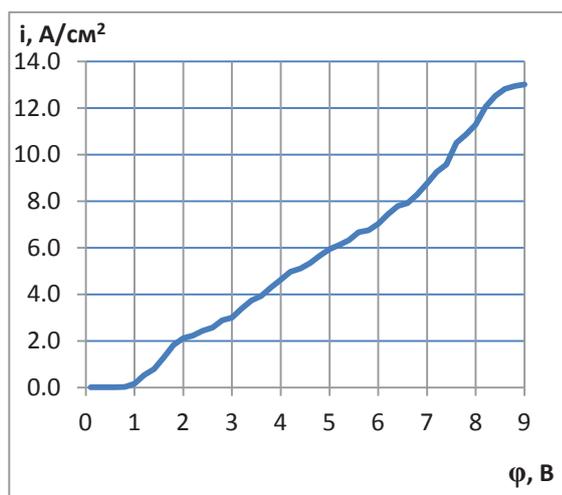


Рис. 2. Кривая электрохимического растворения покрытия на основе порошкового материала ПГ – 10Н – 01 в 10 % водном растворе Na_2SO_4

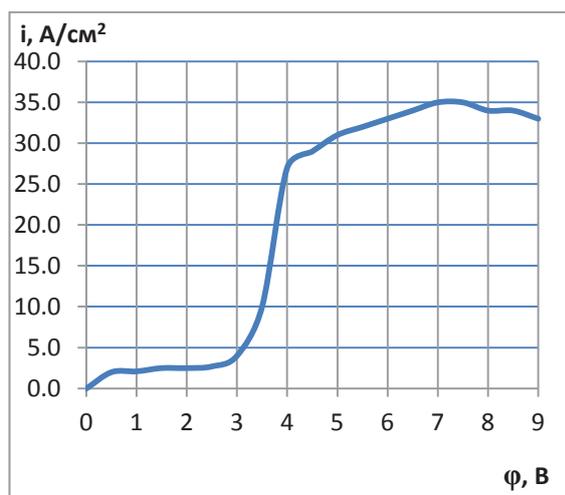


Рис. 3. Кривая электрохимического растворения покрытия на основе порошкового материала ПГ – 10Н – 01 в 10 % водном растворе NaCl

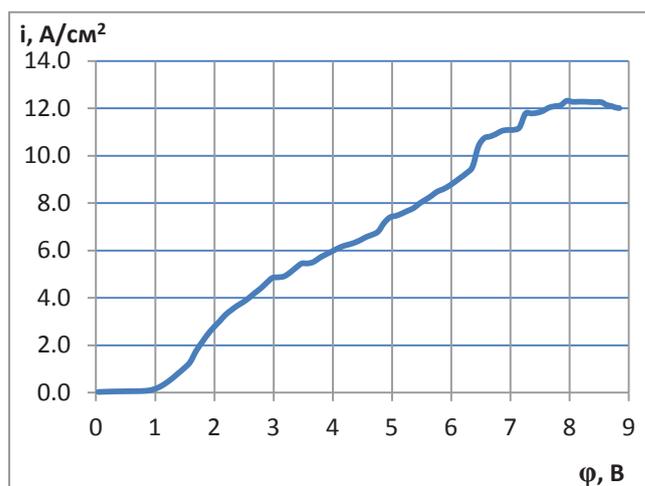


Рис. 4. Кривая электрохимического растворения покрытия на основе порошкового материала ПГ – 10 – 01 в 10 % водном растворе NaNO_3

Выводы

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что растворение покрытия на основе порошкового материала ПГ – 10Н – 01 в растворах NaNO_3 и NaCl сопровождается пассивационными явлениями.

Возможно, что к торможению процесса растворения приводит пассивация компонентов, входящих в состав ПГ – 10Н – 01. В 10 % водном растворе Na_2SO_4 наблюдается активное растворение покрытия во всем исследуемом диапазоне потенциалов. Для процесса электроалмазного шлифования покрытия ПГ – 10Н – 01 рекомендуется 10 % водный раствор NaCl .

Список литературы

1. Gnyusov S.F. Electron beam in technology surfacing of the powder rapid steel / Gnyusov S.F., Ignatov A.A., Durakov V.G. // В сборнике: Proceedings - International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV Сер. "25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, ISDEIV 2012". – 2012. – С. 561 – 563.
2. Панин В.Е., Белюк С.И., Дураков В.Г., Прибытков Г.А., Ремпе Н.Г. Электронно-лучевая наплавка в вакууме: оборудование, технология, свойства покрытий // Сварочное производство. – 2000. - № 2. – С. 34 – 38 .
3. Рахимянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В., Красильников Д.Б. Электрохимическая обработка безвольфрамовых твердых сплавов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. - №3. – С. 3 – 7.
4. Рахимянов Х.М., Моисеенко А.Н., Янпольский В.В. Электроалмазная обработка напыленных износостойких покрытий // Инженерия поверхностного слоя деталей машин: сборник трудов Международной научно-практической конференции 9 – 11 декабря 2009 г., г. Кемерово, Кемерово., КузГТУ. – 2009. – С. 365 – 369.
5. Рахимянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В., Никитенко М.И., Моисеенко А.Н. Электрохимическое растворение покрытий из порошковых материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. - № 2. – С. 3 – 5.
6. Рахимянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В. Повышение производительности процесса электроалмазного шлифования быстрорежущих сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. - № 4. – С. 7 – 8.
7. Невский О.И. Электрохимическая размерная обработка металлов и сплавов. Проблемы теории и практики. Монография / О.И. Невский, В.М. Бурков, Е.П. Гришина, Е.Л. Гаврилова, А.В. Балмасов, А.В. Носков, М.Г. Донцов. - ГОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т. - Иваново. – 2006. – 282 с.
8. Ming P., Zhu D., Xu Z.. Electrochemical grinding for unclosed internal cylinder surface//14th Conference of Abrasive Technology in China: Nanjing, PEOPLES R. – 2007. – pp. 360 – 364.

**FEATURES OF ELECTROCHEMICAL DISSOLUTION OF THE COATING BASED
ON POWDER MATERIAL PG – 10N – 01**

Yanpolskiy V.V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e – mail: yanpolskiyv@mail.ru

Kadyrbaev R.M., Ph.D. Student, e – mail: kadyrbaev.2013@corp.nstu.ru

Ivanova M.V., Ph.D. student, e – mail: ivanova777888@yandex.ru

Yusupov A.S., Master student, e – mail: yusupov-a@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The article deals with the features of electrochemical dissolution of the coating in aqueous solution of neutral salts NaNO_3 , Na_2SO_4 , NaCl . Polarization investigations of the electrochemical dissolution of coating PG – 10N – 01 in potentiodynamic modes are presented. Installation scheme for polarization studies are submitted. It is found, that dissolution of the coating in an aqueous solution of 10 % Na_2SO_4 occurs in the active state before the potential $\varphi = 9 \text{ V}$. When the coating PG – 10N – 01 is dissolved in 10 % NaNO_3 solution, there are areas of active ($\varphi = 1 \dots 8 \text{ V}$) and passive ($\varphi = 8 \dots 9 \text{ V}$) dissolution. In the 10 % NaCl solution, the areas of passivation, activation and transpassivation of the coating surface are observed. The revealed features of material electrochemical dissolution allows to set the values of technological regimes of electrochemical grinding of parts with coatings.

Keywords: electrochemical grinding, powder coatings, electrochemical dissolution.

УДК 621.787: 621.91

**К МЕХАНИЗМУ ИЗНОСА ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УПРОЧНЯЮЩЕ – ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКЕ**

*ГИЛЕТА В. П., канд. техн. наук, доцент,
БЕЗНЕДЕЛЬНЫЙ А. И., канд. техн. наук, доцент,
АСАНОВ В. Б., канд. техн. наук, доцент,
БЫЧКОВ Н. В., магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Гилета В.П. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: v.gileta@corp.nstu.ru

Аннотация

Проведено электронно-микроскопическое исследование морфологии площадки износа и её состояния после вытравливания кобальта (Co) с помощью реплик. Выполнен рентгеноспектральный микроанализ площадки износа. Явных следов адгезионного, диффузионного, абразивного износов не обнаружено. Показано, что износ твёрдосплавного инструмента ВК8 при ультразвуковой упрочняюще-чистой обработке, в основном, происходит в результате усталостного разрушения, что приводит в исследуемой области скоростей детали 10...120 м/мин к выпадению отдельных карбидных зёрен и целых их групп. Нелинейный характер кривой «износ-скорость» объясняется аллотропными превращениями кобальта. Установлено, что при скоростях 10...50 м/мин кобальт претерпевает первое аллотропное превращение из исходного состояния β -Co в α -Co, а затем при скорости более 50 м/мин происходит второе частичное аллотропное превращение α -Co в β -Co. Наличие фазы β -Co, являющейся более хрупкой, приводит к интенсификации износа.

Ключевые слова: инструмент, индентор, износ, площадка износа, твёрдый сплав, карбид вольфрама, кобальт, аллотропное превращение, скорость детали, морфология поверхности, травление, электронно-микроскопическое исследование, рентгеноспектральный микроанализ.

Введение

Эффективным методом повышения качества поверхностного слоя деталей машин, работающих в условиях трения скольжения, качения и циклической усталости, является ультразвуковая упрочняюще-чистовая обработка (УЗО). Воздействие индентора, жестко закрепленного в инструментально-волноводе, вызывает дробную контактно-сдвиговую деформацию в поверхностном слое обрабатываемой детали, обуславливающую изменение физико-механических и геометрических характеристик [1, 2, 4]. Так на закаленной высокопрочной стали ШХ15 шероховатость поверхности по параметру Ra снижается до 0,16 мкм, микротвердость повышается до 30% и может составлять 10000 МН/м², а твердость HRC увеличивается на 1...2 единицы по сравнению с исходными характеристиками. По мере работы происходит износ инструмента, который приводит к снижению упрочняющее – чистового эффекта [3]. Поэтому исследование износа и выявление его механизма с целью определения режимов обработки, обеспечивающих минимальный износ, является актуальным.

Материалы, оборудование и методики экспериментального исследования

В качестве материала индентора при УЗО могут быть использованы твердые сплавы, инструментальные стали и сверхтвердые материалы. Сравнительные испытания на износ показали, что из рассмотренного ряда материалов: ВК2, ВК4М, ВК8, ВК8М, ВК15, ВК60М, Т15К6, Т30КМ, Р6М5, Р18, ШХ15 наибольшей износостойкостью обладает сплав ВК8 [3, 5]. Износ рабочей части инструмента (индентора) из ВК8 изучался при обработке деталей, изготовленных из высокопрочной стали ШХ15 закаленной и низкоотпущенной. Эта сталь широко распространена в промышленности и обладает значительной истирающей способностью. В качестве образцов для испытаний на изнашивание были выбраны внутренние кольца роликового железнодорожного подшипника с твердостью HRC 60 – 62, с микротвердостью поверхности $HV = 7800 \text{ МН/м}^2$ и исходной шероховатостью $Ra 0,63 \text{ мкм}$.

Изнашивание проводилось с использованием модернизированного токарного станка 1К62, оснащенного приспособлением для УЗО и специальными приставками для измерения площадок износа. Источником колебаний служил магнитострикционный преобразователь ПМС – 15А – 18, подключенный к ультразвуковому генератору УЗГ2 – 4. Амплитуда колебаний инструмента определялась оптическим методом. Статическое усилие прижатия инструмента к детали создавалось тарированными грузами. При исследовании варьировались статическое усилие $P_{ст}$ и скорость детали V в диапазонах 100...300 Н и 10...120 м/мин. Остальные параметры режимов обработки принимались постоянными: амплитуда колебаний инструмента $2A = 40 \text{ мкм}$, частота колебаний $f = 18 \text{ кГц}$, подача $S = 0,07 \text{ мм/об}$, СОЖ – масло индустриальное 45. Радиус рабочей части инструмента выполнялся равным 5 мм.

Сферическая поверхность на инденторе получалась электрохимическим методом с последующей доводкой алмазными пастами. Отклонение формы профиля сферы находилось в пределах $\pm 0,01 \text{ мм}$, а шероховатость по параметру R_z не превышало 0,30 мкм. Морфология площадки износа изучалась с использованием оптического микроскопа МИМ – 8М и электронного микроскопа EF – 4 на двухступенчатых репликах. Для получения первичных отпечатков использовалась ацетилцеллюлозная плёнка. Вторичный отпечаток создавался одновременным напылением углерода и платины на контактную сторону первичного отпечатка под углом 23° , а затем первичный отпечаток растворялся в метилацетате.

Микроспектральный анализ фазового состава твердого сплава на площадке износа проводился на анализаторе MAP – 2.

Изнашивание инструмента оценивалось по среднему диаметру площадки износа, полученному измерениями диаметров в направлениях подачи и скорости. Измерения проводились с использованием специальной приставки на базе оптической системы микротвердомера ПМТ – 3 (погрешностью $\pm 0,005 \text{ мм}$), устанавливаемой непосредственно на суппорте станка.

При этом необходимо отметить, что через 20...25 минут работы вокруг площадки износа наблюдается матовый ореол в виде пояса, обусловленный кавитационными процессами в СОЖ [2], хотя в зоне контакта кавитационного разрушения нами не обнаружено. Поэтому в дальнейшем этот поясок не учитывался и в размер площадки не включался.

Морфология поверхности площадки износа изучалась после вытравливания Со-фазы электрохимическим методом. В качестве электролита использовался 15% раствор NaCl в воде. Образец служил анодом, на который подавался потенциал $U_a = 0,35 \text{ В}$. Время травления составляло 40 секунд. Электронномикроскопическое исследование проводилось на всей площадке износа – 0,7...1,3 мм.

Результаты и обсуждения

Характерный вид площадки износа индентора из твердого сплава ВК8 после УЗО представлен на рис. 1.

Как видно из рисунка, форма площадки износа близка к кругу, поэтому в качестве критерия износа принимался усредненный диаметр.

Отсутствие царапин на площадке износа говорит о том, что абразивного изнашивания при УЗО не происходит.

Износ индентора изучался в зависимости от пройденного пути (рис. 2) и времени испытаний (рис. 3). Несмотря на внешнюю схожесть графиков (см. рис. 2 и 3) видно, что в области скоростей 10...40 м/мин размеры площадок износа у рассматриваемых кривых $d = f(L)$ и $d = f(t)$ различны.

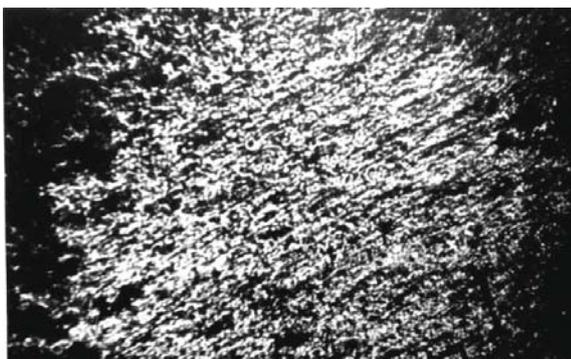


Рис. 1. Площадка износа

Это объясняется спецификой воздействия индентора на поверхность обрабатываемой детали, которое является не непрерывным, а повторно – ударным. При УЗО одному и тому же пути трения на различных скоростях обработки соответствует различное количество циклов взаимодействия индентора с поверхностью детали. Поэтому для создания равноценных условий изучения износа в зависимости от скорости (обеспечения равного числа циклов нагружения) необходимо исследования проводить при одинаковом времени работы инструмента.

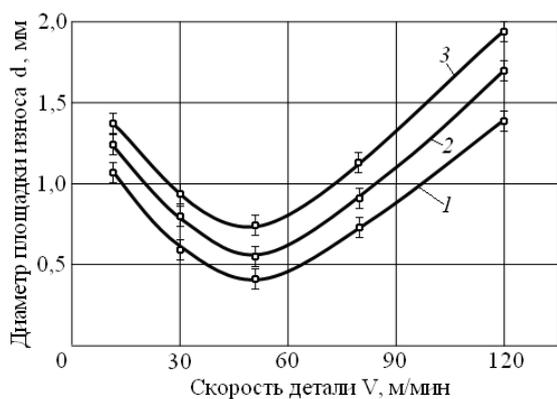


Рис. 2. Кривые износа при пути трения 1700 м:
1 – $P_{ст} = 200$ Н; 2 – $P_{ст} = 300$ Н;
3 – $P_{ст} = 400$ Н

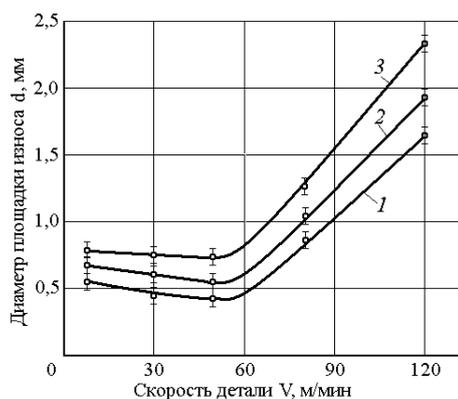


Рис. 3. Кривые износа при одинаковом времени работы равном 34 минуты:
1 – $P_{ст} = 200$ Н; 2 – $P_{ст} = 300$ Н;
3 – $P_{ст} = 400$ Н

Оптический анализ морфологии площадки износа инструмента у сплава ВК8 показал, что адгезионный механизм износа не характерен при УЗО деталей из стали ШХ15. На площадке износа не обнаруживаются следов налипания обрабатываемого материала и других элементов во всем диапазоне исследованных скоростей и статических нагрузок. Отсутствие следов адгезии железа подтверждает микрорентгеноспектральный анализ, проведенный на анализаторе MAP – 2. Выявленное содержание вольфрама, кобальта на площадке износа соответствует новому инструменту из ВК8, следовательно, диффузионный износ также не присущ для твердого сплава ВК8 при УЗО.

Из выведенных данных (явных следов присутствия адгезионного, диффузионного, абразивного износа нами не обнаружено) можно сделать предположение, что основной вклад в износ инструмента вносит его усталостное разрушение. Дальнейшие исследования были направлены на доказательство этого предположения. Опыты проводились для установления особенностей усталостного разрушения твёрдосплавного инструмента из ВК8 при различных скоростях детали и статических нагрузках. Результаты этих опытов показали, что с изменением скорости детали выявление карбидных зёрен сплава ВК8 происходит по-разному (рис. 4).

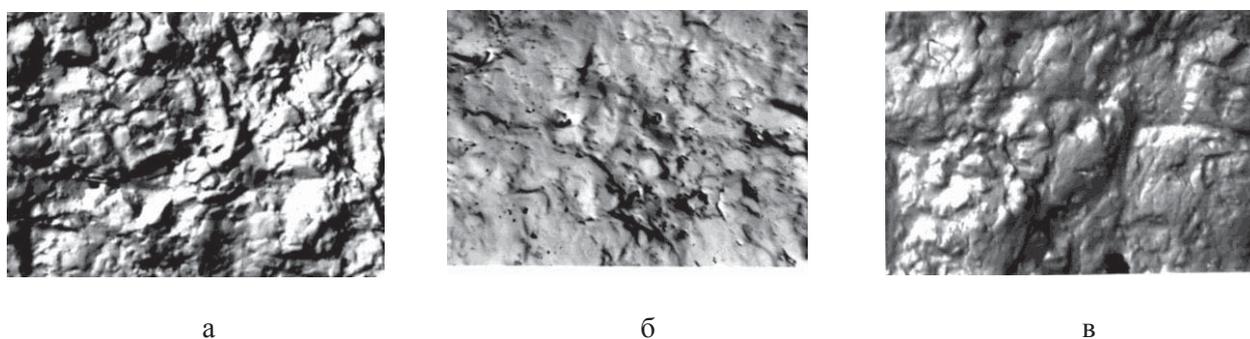


Рис. 4. Поверхности площадок износа твердого сплава ВК8.

Реплика $\times 3000$:

а – $V = 10$ м/мин; б – $V = 50$ м/мин; в – $V = 120$ м/мин

При скорости 10 м/мин карбиды имеют четкие границы (рис. 4, а). С увеличением скорости четкость границ ослабевает, очертания карбидов округляются и становится сложно выявить наличие карбидов в отдельных случаях (рис. 4, б, в). Четкость границ можно объяснить межфазным скольжением WC-Co [6, 7]. Кобальт, подвергаясь интенсивной пластической деформации и частичному разрушению, остается на поверхности карбидов, смазывая их границы, что подтверждается микрорентгеноструктурным анализом.

В зависимости от скорости детали изменяется и морфология карбидов (рис. 5).

При скоростях детали 10...50 м/мин преобладают карбиды без каких-либо следов разрушения (рис. 5, а), при скоростях свыше 50 м/мин на поверхности WC наблюдаются дефекты в виде ямок и сколов (рис. 5, б, в).

Неоднородный характер электрохимического травления площадки износа твердого сплава ВК8 (рис. 6) говорит, что на восходящем правом участке кривой износа кобальт существует одновременно в двух фазах: α -Co и β -Co. При скоростях детали до 50 м/мин кобальт имеет структуру ГЦК (α -Co) и обладает хорошей пластичностью. Затем при повышении скорости детали кобальт частично претерпевает второе аллотропическое превращение из α -Co в β -Co со структурой ГП (менее пластичной). По этой фазе, в основном происходит более интенсивное разрушение с выпадением отдельных карбидов или их групп.

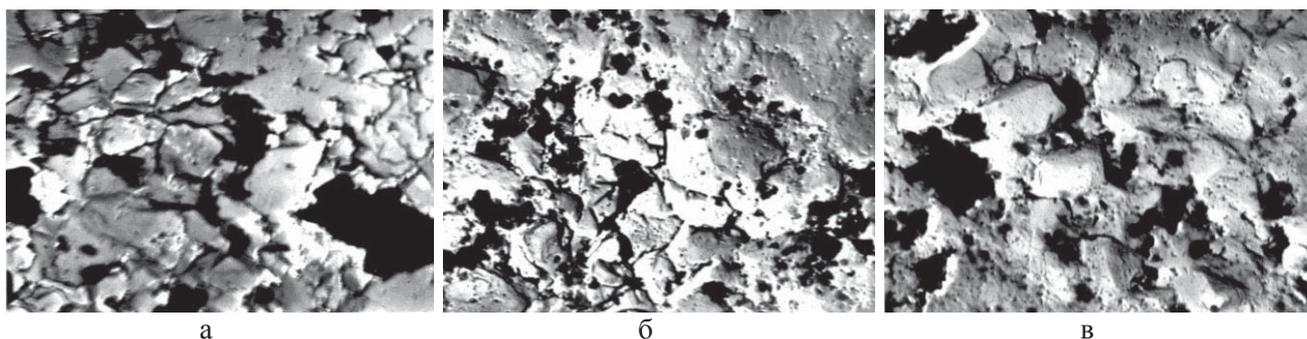


Рис. 5. Поверхность карбидов WC (вытравлен Co). Реплика, x3000:
а – $V = 50$ м/мин; б – $V = 80$ м/мин; в - $V = 120$ м/мин

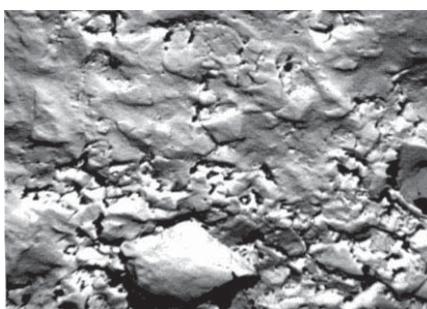


Рис. 6. Очаговый характер травления кобальта.
Реплика x3000. $V = 80$ м/мин

Выводы

1. Основной механизм износа твёрдосплавного инструмента из ВК8 при упрочняюще-чистовой обработке с наложением ультразвуковых колебаний (УЗО) стали ШХ – 15 – усталостный. Явных следов адгезионного, диффузионного и абразивного износа не обнаружено.
2. Разрушение твёрдосплавного инструмента при УЗО стали ШХ – 15 в диапазоне скоростей 10..120 м/мин происходит целыми карбидными зёрнами или их группами. Нелинейный характер износа инструмента от скорости детали объясняется аллотропными превращениями кобальта.
3. Интенсификация процесса износа при скоростях детали более 50 м/мин происходит в результате присутствия на рабочей площадке кобальта в двух фазовых состояниях α -Co в β -Co.
4. Минимальный износ индентора из твердого сплава ВК8 наблюдается в диапазоне скоростей 40...60 м/мин.

Список литературы

1. Гилета В.П., Безнедельный А.И., Асанов В.Б. Выбор материала деформаторов для упрочняюще-чистовой обработки ультразвуковым инструментом // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 163 – 168.
2. Гилета В.П., Безнедельный А.И., Асанов В.Б. Влияние СОЖ и присадок на износ инструмента при ультразвуковой упрочняюще-чистовой обработке // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 158 – 162.

3. Гилета В.П., Безнедельный А.И., Асанов В.Б. Износостойкость инструмента и качество поверхности при ультразвуковой упрочняюще-чистовой обработке // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2015): сб. тр. 7 междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 23 – 25 сент. 2015 г. – Кемерово : КузГТУ, 2015. – С. 77 – 81.
4. Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С. Технологическое обеспечение геометрических параметров качества поверхности при ультразвуковом пластическом деформировании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. - № 3. – С. 33 – 36.
5. Гилета В.П., Асанов В.Б., Безнедельный А.И. Технологические возможности поверхностного пластического деформирования с использованием ультразвуковых колебаний // Труды междунар. науч.-практ. конф. «Инженерия поверхностного слоя деталей машин», Кемерово, 2009. – С. 75 – 79.
6. Третьяков И.П. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. М.: Металлургия, 1976. – 528 с.
7. Талантов И.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. М.: Машиностроение. 1992. – 240 с.

TO THE MECHANISM OF WEARING OF THE HARD ALLOY TOOL UNDER ULTRASONIC REINFORCING FINISHING TREATMENT

Gileta V.P., Ph.D. Engineering, Associate Professor, e – mail: v. gileta@corp.nstu.ru

Beznedelnyj A.I., Ph.D. Engineering, Associate Professor, e – mail: beznedelnyj@corp.nstu.ru

Asanov V.B., Ph.D. Engineering, Associate Professor, e – mail: asanov@corp.nstu.ru

Bychkov N.V., Master student, e – mail: e – mail: v. gileta@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

An electron microscopic study of the morphology of the wear surface and its state after cobalt (Co) etching out by replicas has been carried out. X-ray microanalysis of the wear site was performed. No obvious traces of adhesive, diffusion, abrasive wear were detected. It is shown that the wear of the carbide tool VK8 during the reinforcing finishing treatment with ultrasound is mainly due to fatigue failure, which leads in the investigated range of the part speed 10 ... 120 m / min to the precipitation of individual carbide grains and whole groups of them. The non-linear nature of the wear-rate curve is due to allotropic transformations of cobalt. It is shown that, at velocities of 10 to 50 m / min, cobalt undergoes the first allotropic transformation from the initial state of β -Co to α -Co then a second partial allotropic conversion of α -Co to β -Co takes place at a velocity of more than 50 m / min. The presence of a β -Co phase, which is more brittle, leads to an intensification of wear.

Keywords: tool, indenter, wear, wear site, hard alloy, tungsten carbide, cobalt, allotropic transformation, component speed, surface morphology, etching, electron microscopy, X-ray microanalysis.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА ПРОТОЧНОГО ХРОМИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СТВОЛОВ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ

*БЕЛЯЕВ В. Н., канд. техн. наук, нач. отдела,
КОЗЛЮК А. Ю., канд. техн. наук, с.н.с.,
ЛОБУНЕЦ А. В., инженер,
АНДРЕЕВ А. С., инженер
(АО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск, Россия)*

Беляев В.Н. – 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
ОА «ФНПЦ «Алтай»,
е – mail: lab.nanodiamond@rambler.ru

Аннотация

Представлены результаты исследования способа проточного хромирования внутренней поверхности стволов стрелкового оружия. Описаны технологические режимы и оборудование для получения хромовых покрытий внутренних поверхностей стволов стрелкового оружия с градиентными физическими свойствами. Результаты исследования показали, что применение ультрадисперсных алмазов в составе электролита, а также вращение детали и изменение температуры электролита в процессе хромирования позволяют получить хромовые покрытия с градиентными физическими свойствами.

Ключевые слова: гальваническое покрытие, стрелковое оружие, проточное хромирование, ультрадисперсный алмаз.

Введение

В настоящее время предъявляются высокие требования к эксплуатационным характеристикам металлических покрытий, которые на практике обеспечивают получением равномерных по длине изделия толшины и свойств покрытия, что особенно актуально при производстве стволов стрелкового оружия. Для хромирования таких длинномерных изделий применяют технологию хромирования в проточном электролите, или проточное хромирование [1]. Процесс хромирования характеризуется тем, что в зависимости от катодной плотности тока и температуры электролиза можно получать различные по физическим и эксплуатационным свойствам осадки хрома (молочные, износостойкие, серые) [2].

Реализовать получение многослойных хромовых покрытий на практике возможно несколькими способами:

1. Погружением в проточную ванну с электролитом вертикально расположенной сборки ствола с анодом. Недостатками такого способа являются: во-первых, ухудшенные характеристики покрытий ввиду затруднительного удаления водорода из прикатодной зоны в процессе хромирования, во-вторых необходимость использования дополнительной изоляции наружной поверхности изделия для исключения ее из электрохимического процесса, в-третьих ухудшение экологических параметров процесса и его затраты из-за использования значительных объемов электролита.

2. Использованием проточного электролита путем его пропускания внутри горизонтально или наклонно расположенной сборки ствола с анодом. К недостаткам такого способа следует отнести снижение механических характеристик хрома из-за неравномерной толшины и свойств покрытия по длине изделия, связанных с неоднородной электропроводностью электролита,

обусловленной выделением водорода. Несмотря на то, что процесс рекомендуется вести при наклонном положении изделия (угол $30 - 70^\circ$), с подачей электролита со стороны ее нижнего торца, возникает различная электропроводность электролита в верхней и нижней частях за счет накопления водорода. Это приводит к различной катодной плотности тока и неравномерным свойствам покрытия в верхней и нижней частях изделия, появлению значительных остаточных напряжений в осаждаемых слоях и образованию микротрещин по объему электролитического хрома [3].

Для исключения вышеперечисленных недостатков при проточном хромировании внутренних поверхностей труб был разработан способ получения многослойных хромовых покрытий [4]. Способ заключается в пропускании электролита внутри горизонтально расположенной трубы с анодом, отличающийся тем, что хромирование осуществляется с получением переходного, молочного и твердого слоев хромового покрытия, предусматривающий получение покрытия с вариативными свойствами в пределах его поперечного сечения. В ходе процесса используют постоянный электрический ток и трубу непрерывно вращают, а анод размещают осесимметрично относительно оси вращения трубы.

Экспериментальная часть

Для реализации способа была спроектирована и изготовлена установка, позволяющая получать хромовые покрытия на внутренней поверхности длиномерных цилиндрических изделий, длиной до 1 метра и внутренним диаметром до 40 мм.

Оборудование для проточного хромирования состоит из ванны для электролита, предусматривающая как поддержание постоянной температуры, так и ее изменение в ходе процесса нанесения, и установки проточного хромирования (рис. 1).

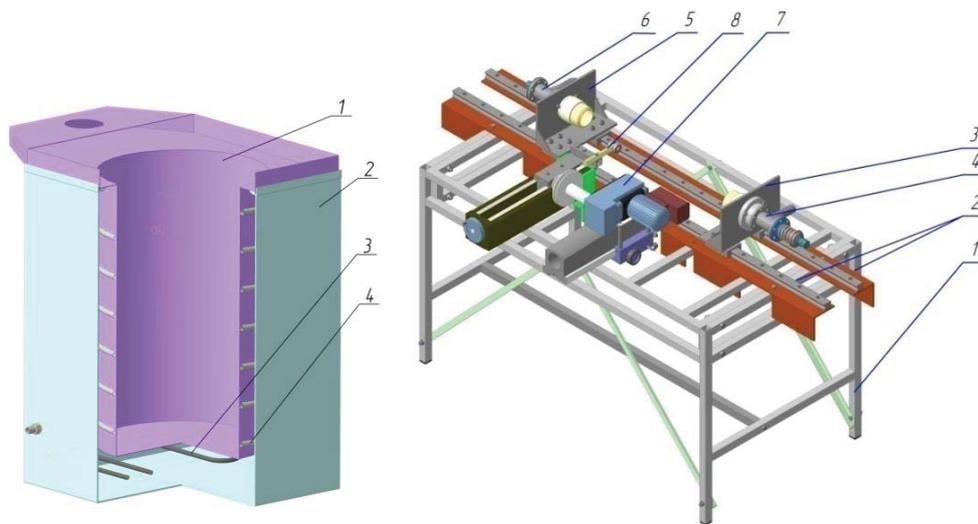


Рис. 1. Ванна для электролита и установка проточного хромирования

Емкость для электролита хромирования 1 имеет цилиндрическую форму, выполнена из титанового сплава и снабжена рубашкой охлаждения и нагрева 2. Для нагрева теплоносителя в рубашке (дистиллированная вода) используются два электрических ТЭН 3, мощностью 2,4 кВт. Для охлаждения предусмотрен змеевик 4 помещенный вокруг ванны, через который в процессе охлаждения пропускают холодную водопроводную воду.

В верхней части ванны предусмотрен односторонний бортоотсос прямоугольной формы, который улавливает пары нагретого электролита в процессе работы, не позволяя им попасть в воздух рабочей зоны помещения.

Установка проточного хромирования стволов состоит из следующих узлов: 1 – рама; 2 – направляющие; 3, 5- подвижные уголки; 4 – напорный узел; 6 – сливной узел; 7 – привод вращения; 8 – компенсатор радиального усилия натяжения ремня. Напорный и сливной узлы подключаются с помощью шлангов к гидрозапорной арматуре, установленной на крышке ванны хромирования.

Изделие в процессе хромирования размещается между подвижными уголками 3 и 5, которые стягиваются с помощью стального оцинкованного анода, концентрично расположенного внутри.

Установка позволяет осуществлять полное вращение изделия относительно анода в процессе хромирования частотой от 0 до 500 об/мин. Вращение передается от привода 7 через клиноременную передачу. Для компенсации радиального усилия натяжения ремня предусмотрен компенсатор 8, который вблизи расположения ремня радиально прижимается к изделию, нивелируя тем самым радиальные усилия на опоры. Кроме того, в установке предусмотрен пружинный механизм натяжения анода, расположенный на напорном узле 4, для осуществления герметичности конструкции и исключения провисания анода.

Напорный и сливной узлы установки подключаются с помощью шлангов к гидрозапорной арматуре, установленной на крышке ванны хромирования для покачивания электролита.

Хромированию подвергались охлажденные стволы винтовок калибра 12,7 мм, производства завода им. Дегтярева (г. Ковров). Длина покрываемой поверхности 1050 мм, диаметр 12,7 мм (поверхность с нарезами), диаметр анода 6 мм. Деталь в процессе хромирования вращалась относительно анода со скоростью 200 об/мин.

Электролит использовался сульфатного типа, следующего состава (г/л): хромовый ангидрид – 250; серная кислота – 2,5; ультрадисперсный алмаз (УДА) – 10. Начальное значение температуры электролита в процессе хромирования – 68° С с последующим снижением до 50° С.

Для повышения физико-механических свойств градиентного покрытия в электролит вводили водную суспензию УДА. Частицы нанодIAMAZОВ перемешиваются потоком электролита и перемещаются с его скоростью и, имея большую запасенную энергию, ударяются о покрываемую поверхность, а впоследствии о поверхность очередного покрытия, активируют её и создают большее число центров кристаллизации. Этим обеспечивается образование мелкозернистой структуры каждого слоя и увеличивается адгезия к матрице и между слоями, плотность их структуры и, как следствие, повышенные физико-механические характеристики осадков [5].

В процессе хромирования канала ствола обеспечивается стабильная плотность рабочего тока на всей покрываемой поверхности $J = 40 \text{ А/дм}^2$, исходя из которой рассчитывалась токовая диаграмма процесса (рис. 2).

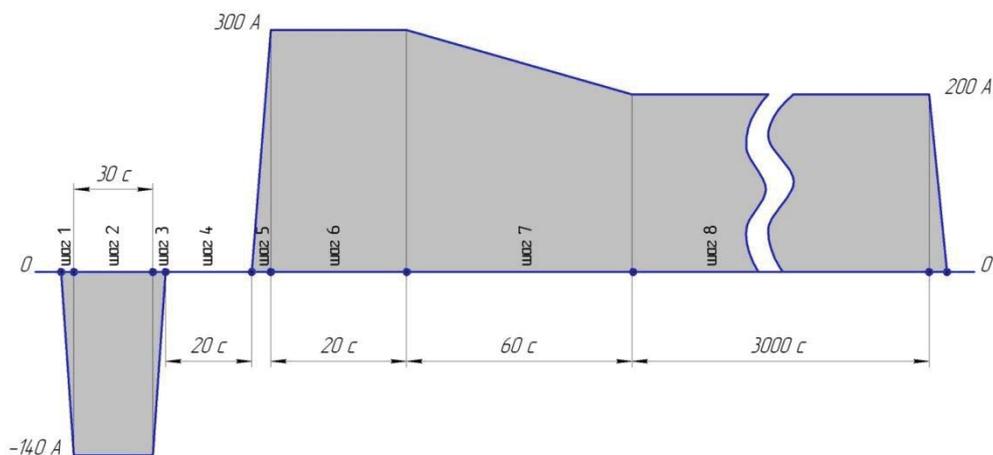


Рис. 2. Токвая диаграмма процесса проточного хромирования

Общая площадь покрываемой поверхности ($S = 4,9342 \text{ дм}^2$) автоматически рассчитывается согласно 3D модели.

Результаты

Для проведения исследований покрытий вырезались образцы длиной 100 мм из различных участков изделия (рис. 3).



Рис. 3. Образцы хромового покрытия

Благодаря вращению изделия небольшие отклонения в установки анода относительно оси детали, компенсируются. Равномерность полученного покрытия, определяясь путем измерения его толщины на различных участках детали.

Толщина покрытия определялась вихретоковым методом с помощью многофункционального прибора измерения геометрических параметров «Константа К6». Измерение каждого образца проводилось по 10 точкам вдоль образующей линии с усреднением в 4 измерения и двух диаметрально расположенных точках в радиальном сечении с усреднением в 4 измерения.

Измерение микротвердости производится на образующей линии образца длиной 100 мм с усреднением из 5 измерений в каждой точке измерения. Всего каждый образец исследовался в 10 точках. Измерение проводилось твердомером «Константа ТУ». Результаты измерения микротвердости образцов показали стабильную поверхностную микротвердость по длине для всех образцов, значения которой находятся в диапазоне 840 – 960 НВ.

Полученные образцы покрытий исследовались на растровом электронном микроскопе АО «ФНПЦ «Алтай». На рис. 4 представлены примеры фотографий поверхности покрытия и поверхности излома, на которых можно наблюдать градиентное покрытие, полученное в результате изменения температуры в процессе нанесения покрытия.

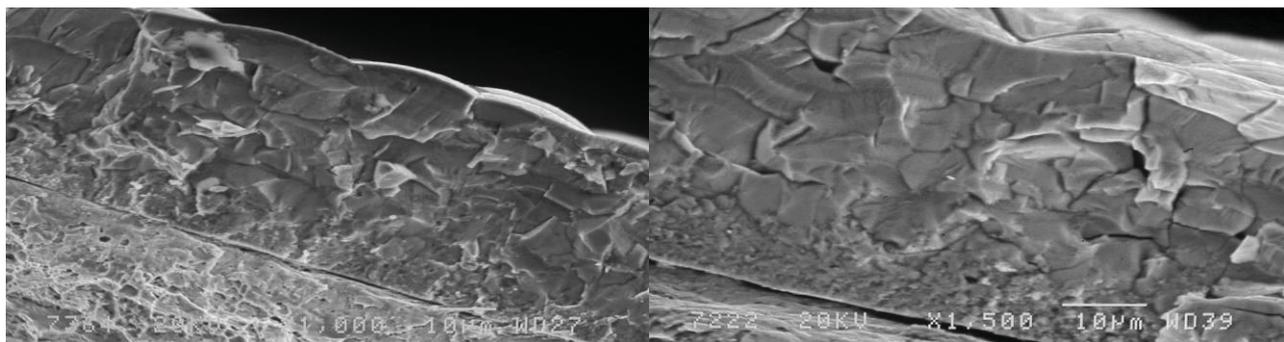


Рис. 4. Поверхность излома хромового покрытия

При анализе фотографий поверхностей изломов и наружных поверхностей хромовых покрытий отмечается уменьшение размера субзерен хромового покрытия, а также менее выраженные трещины на покрытии. Количество дендритов на поверхности покрытия (в основном на вершинах нарезков) при использовании вращения ствола в процессе хромирования значительно снижается. Трещины на поверхности хрома при осаждении с вращением образца менее выражены, что свидетельствует о меньших внутренних напряжениях.

Выводы

Анализируя поверхность изломов образцов изделий с хромовым покрытием заметно изменение структуры покрытия по толщине. На образце (рис. 5) отчетливо видна мелкозернистая структура на границе перехода хром-подложка. Толщина мелкозернистого хрома составляет порядка 10 – 15 мкм. При увеличении толщины хромового покрытия, размер зерен увеличивается и на толщине порядка 20 – 30 мкм становится стабильным. Изменение размеров зерен по толщине покрытия свидетельствует о переходе от мягкого и вязкого молочного хрома (в начальной стадии осаждения) до твердого и хрупкого блестящего хрома (в средней и конечной стадии осаждения), что подтверждает получение покрытия с градиентными физическими свойствами по толщине.

Список литературы

1. Ажогин Ф.Ф., Бельский М.А., Галль И.Е., Гальванотехника справ. изд. – М.: Metallurgy, 1987. – 210 – 239 с.
2. Черкез М.Б. Хромирование. Л., Машиностроение, 1971 г. – 112 с.: ил
3. Богорад Л.Я. Хромирование. – М.: Машиностроение, 1984. – 97 с.

4. Патент РФ № 2586957 Жарков А.С., Беляев В.Н., Козлюк А.Ю., Андреев А.С. Способ электролитического хромирования внутренней поверхности труб, опубл. 10.06.2016 Бюл. № 16.
5. Козлюк А.Ю. Исследование процесса проточного хромирования с УДА. Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение: Тезисы X Международной конференции «HEMs-2014» (3-5 сентября 2014 г., г. Бийск). – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2014. – С. 173 – 176.

**PERFECTING OF THE WAY OF THE FLOWING CHROME – PLATING OF THE
INTERNAL SURFACE OF TRUNKS OF SMALL ARMS**

Belyaev V.N., Ph.D. (Engineering), e – mail: lab.nanodiamond@rambler.ru

Kozlyuk A.Yu., Ph.D. (Engineering)

Lobunets A.V., Engineer

Andreyev A.S., Engineer

JSC Federal Research & Production Center ALTAI, Russia, Biysk, Socialisticheskaya, 1

Abstract

Results of a research of a way of a flowing chrome-plating of an internal surface of trunks of small arms are presented. The technological modes and the equipment for receiving chromiums of internal surfaces of trunks of small arms with gradient physical properties are described. Results of a research showed that use of ultradispersible diamonds as a part of electrolyte, and also rotation of a detail and change of temperature of electrolyte in the course of a chrome-plating allow to receive chromiums with gradient physical properties.

Keywords: electroplating, small arms, flowing chrome-plating, ultradispersible diam.

УДК 621.7.044.7

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЁТА
ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ МАГНИТНО – ИМПУЛЬСНОЙ
ОБРАБОТКИ**

*ОВЧАРЕНКО А. Г., доктор техн. наук, профессор,
КОЗЛЮК А. Ю., канд. техн. наук, доцент,
КУРЕПИН М. О., инженер
(БТИ АлтГТУ, г. Бийск, Россия)*

Овчаренко А.Г. - 659305, Бийск, ул. Трофимова, 27,
Бийский технологический институт
Алтайского государственного технического университета,
е – mail: tmk@bti.secna.ru

Аннотация

В данной статье описана усовершенствованная версия программы ЭВМ для расчета индуктора и концентратора, используемых в качестве инструмента при магнитно - импульсной обработке. Ранее разработанная программа имела существенные недостатки, которые были устранены в новой версии. Программа позволяет получить эскиз концентратора магнитного поля с размерами и количеством витков индуктора при заданной площади сечения проводника, требуемой напряженности магнитного поля, заряда конденсаторной батареи, а также с учетом количества энергии выделенной в виде тепла и допустимого цикла работы.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка, индуктор, концентратор, импульсное магнитное поле, программа ЭВМ.

Введение

В настоящее время одним из перспективных способов поверхностного упрочнения является магнитно – импульсная обработка (МИО), которая основана на воздействии импульсного магнитного поля высокой напряженности на обрабатываемую поверхность с целью улучшения ее механических и физических свойств [1, 2]. Это позволяет повысить поверхностную твердость и износостойкость обработанного инструмента, а также способствует уменьшению остаточных и усталостных напряжений в структуре материала.

В Бийском технологическом институте на протяжении ряда лет ведется научно-исследовательская работа, направленная на совершенствование существующей технологии МИО, включающая комбинацию импульсного магнитного поля и предварительного индукционного нагрева обрабатываемого инструмента. Комбинированная магнитно-импульсная обработка (КМИО) позволила значительно увеличить эффективность процесса МИО [3 – 7].

В процессе КМИО изделий различных форм и размеров возникает необходимость создания нового рабочего инструмента для магнитно – импульсных установок, а также проверки возможности использования уже имеющегося инструмента. Основными элементами рабочего инструмента являются концентратор и индуктор магнитного поля. Обычный расчет параметров рабочего инструмента для магнитно- импульсной установки является процессом трудоемким и длительным,

что не всегда удобно при большом ассортименте обрабатываемых изделий и (или) выборе из уже имеющегося инструмента.

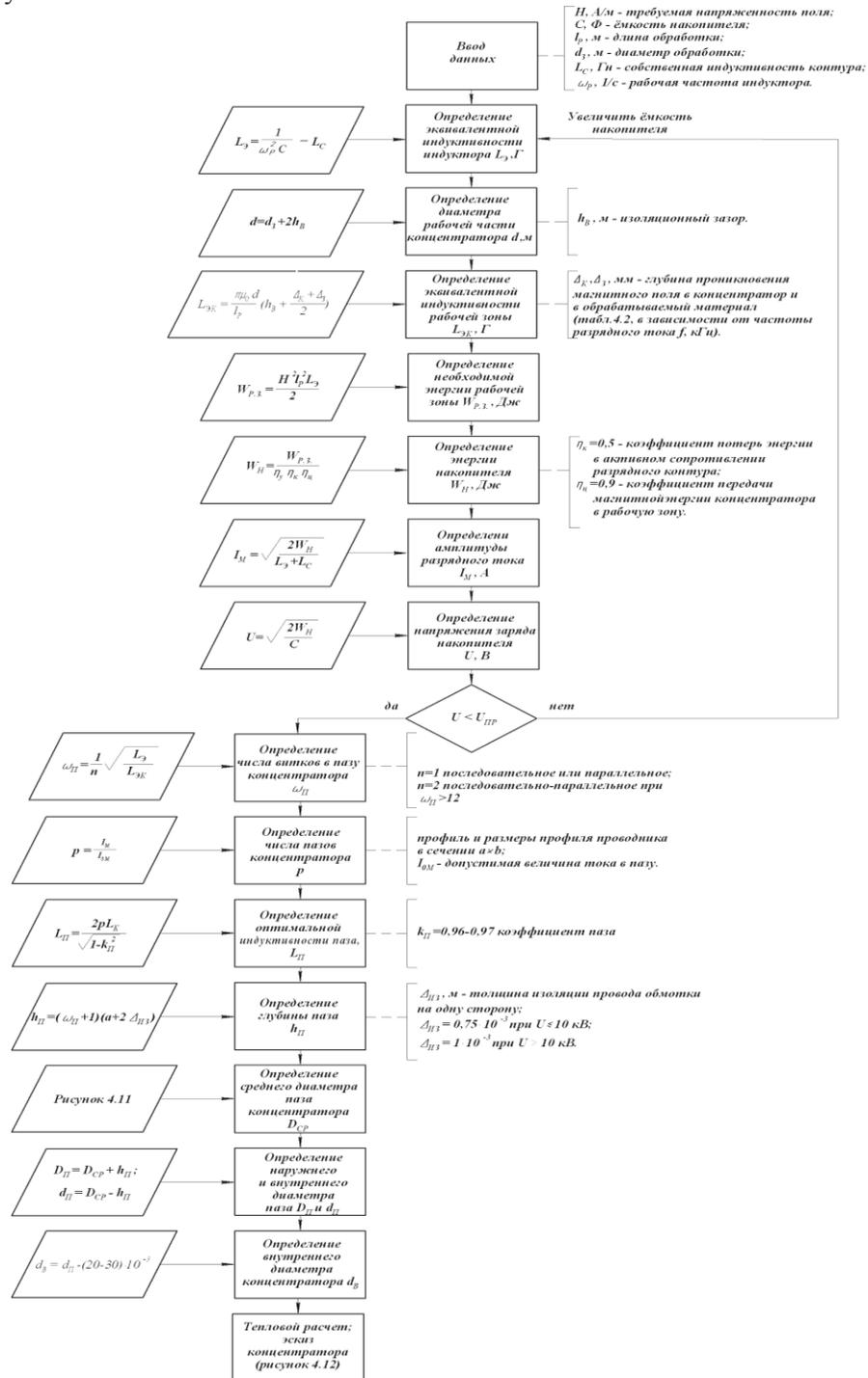


Рис. 1. Алгоритм расчета индуктора для обработки цилиндрической поверхности

Теоретическая часть

Программа рассчитывает параметры рабочего инструмента для КМИО, используя известную методику для установок магнитно-импульсной штамповки (рис. 1) [2].

Ранее созданная программа [2] для ускорения и автоматизации процессов расчета имела существенные недостатки такие как:

- необходимость самостоятельного выбора материала концентратора магнитного поля;
- выбор из справочных таблиц глубины проникновения магнитного поля;
- отсутствие обратного расчета, для оценки возможности использования уже имеющегося концентратора и индуктора магнитного поля при обработке деталей подобной формы и размера;
- необходимость выбора диаметра и количества отверстий в центральной зоне концентратора при расчете параметров обработки плоской поверхности из справочных материалов;
- необходимость выбора изоляционного зазора из справочных материалов;
- необходимость выбора коэффициента паза и других коэффициентов для расчета из справочных материалов;
- необходимость выбора допустимой величины тока в зависимости от площади сечения проводника из справочных материалов;
- результаты расчета были представлены в неокругленном виде, что затрудняло их использование.

Предлагаемая программа лишена выше изложенных недостатков, расчет проводится при минимальном количестве входных данных. Как и в предыдущей версии программы результатом является эскиз концентратора магнитного поля и количество витков индуктора, а также выбор материала для изготовления концентратора магнитного поля и допустимый цикл работы. В случае проверки возможности использования уже имеющегося инструмента для подобных деталей в результате расчета получают значение напряженности магнитного поля в рабочей зоне концентратора магнитного поля и марку материала, из которых должен быть изготовлен концентратор магнитного поля.

Программа для расчета рабочего инструмента КМИО написана на языке программирования Visual basic, при её написании использовалась программа Visual Studio 2010.

Результаты

На первом этапе расчета выбирается вид обрабатываемой поверхности изделия, а также алгоритм расчета прямой или обратный (рис. 2).

На втором этапе вносятся исходные данные для расчета (рис. 3). Для различных форм обрабатываемых поверхностей требуется своя конструкция концентратора магнитного поля.

Основными исходными данными для расчета являются:

- требуемая напряженность магнитного поля;
- ёмкость накопителя;
- размеры зоны обработки;
- собственная индуктивность контура;
- материал обрабатываемой детали;
- профиль и размеры профиля проводника в сечении.

На третьем этапе программа выдает окно с результатами расчета и окно с эскизом концентратора магнитного поля и его размерами (рис. 4).

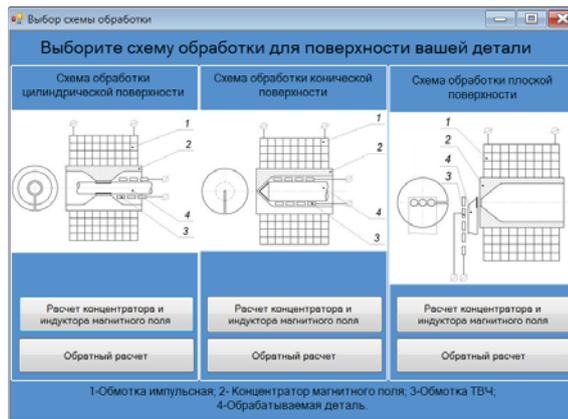


Рис. 2. Окно выбора алгоритма расчета

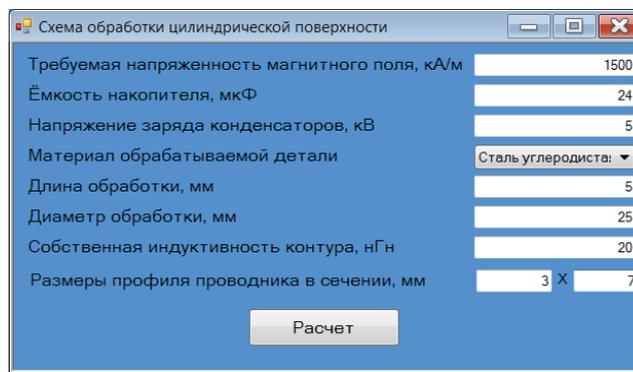


Рис. 3. Окно ввода начальных данных для расчета

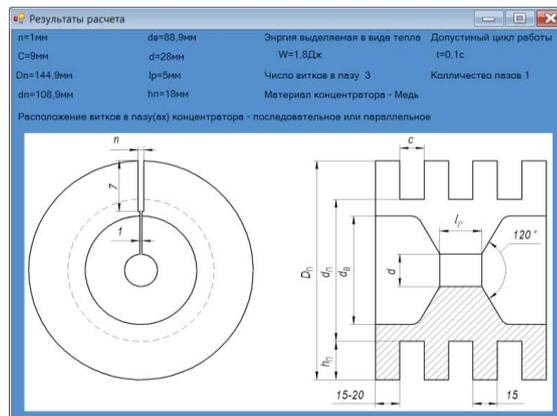


Рис. 4. Окно вывода результатов расчета

Выводы

Таким образом, предлагаемая программа позволила не только значительно ускорить процессы расчета и проектирования основных рабочих элементов установок для комбинированной магнитно – импульсной обработки изделий различной формы, но дает возможность пользователю подобрать уже имеющийся инструмент для обработки других деталей похожей формы и размеров.

Программа проста в использовании, опирается на доступные языки программирования и не требует дополнительных материальных затрат на покупку программного обеспечения.

Список литературы

1. Малыгин Б.В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. – М.: Машиностроение – 1989. – 112 с.
2. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков. Вища школа, 1977. – 168 с.
3. Патент РФ №2244023. Ольховой С.А., Овчаренко А.Г., Ромашев А.Н. Способ повышения износостойкости металлорежущего инструмента из инструментальных сталей путем магнитно-импульсной обработки с предварительным нагревом и установка для его осуществления /Бюл. № 1, 2005. – 6 с.
4. Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю. Повышение износостойкости деталей комбинированной магнитно-импульсной обработкой // Обработка металлов. -2006.- №2.- С.24 – 26.
5. Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю. Моделирование комбинированной магнитно-импульсной обработки //Обработка металлов. - 2007.- №3. – С.17 – 19.
6. Патент РФ №2339704. Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю. Способ комбинированной магнитно-импульсной обработки поверхностей инструментов и деталей машин / Бюл. № 33, 2008. – 6 с.
7. Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю., Курепин М.О. Программа для расчета индуктора и концентратора магнитного поля установки комбинированной магнитно-импульсной обработки // Инновации в машиностроении; труды 4-й Междунар. научно-практ. конф. – Новосибирск; Изд-во НГТУ, 2013. – С.55 – 58.

**THE AUTOMATED METHOD OF CALCULATION OF THE TOOL FOR THE
COMBINED MAGNETIC-IMPULSE TREATMENT**

Ovcharenko A.G., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: pbuk@bti.secna.ru

Kozlyuk A.Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor

Kurepin M.O., Engineer

Biysk Technological Institute, Trofimova str. 27, Biysk, 659305, RUSSIA

Abstract

In given article improved version of the computer program for calculation inductor and the concentrator magnetic-impulse installation is described. In the improved version of the computer program was a reduced amount of initial data. The calculation results are presented in a more convenient form. Initial data for calculation are:

- the necessary magnetic field intensity;
- value of capacitor;
- size of area of processing;
- self-inductance of the circuit;
- material of the work piece;
- profile and size the profile of the conductor in cross-section.

The computer program allows to receive the sketch of the concentrator of a magnetic field with the sizes and quantity of coils inductor at the set area of section of the conductor for demanded intensity of a magnetic field and a charge capacitors battery.

Keywords: magnetic-pulse processing, inductor, concentrator, pulse magnetic field, computer programs.

УДК 621.793.74

КАЧЕСТВО МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

*ИВАНЦИВСКИЙ В. В., доктор техн. наук, доцент,
ЗВЕРЕВ Е. А., канд. техн. наук,
ВАХРУШЕВ Н. В., аспирант,
БРЕДИХИНА А. Н., магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Вахрушев Н. В. – 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: vah_nikit@mail.ru

Аннотация

Рассмотрено одно из перспективных направлений повышения качества износостойких плазменных керамических покрытий за счет применения механических смесей из различных порошковых материалов. Проведен обобщенный металлографический анализ исследуемых металлокерамических покрытий и представлена графическая структурная модель, отображающая специфику их формирования. Приведены результаты исследования микротвердости и адгезионной прочности покрытий из никель – керамической и кобальт – керамической механических смесей.

Ключевые слова: плазменное покрытие, оксидная керамика, никелевый порошок, кобальтовый порошок, микротвердость, адгезионная прочность, механические смеси.

Введение

Плазменные износостойкие покрытия получили широкое применение при упрочнении рабочих органов самого различного технологического оборудования. Одним из распространенных материалов является керамика на основе оксида алюминия Al_2O_3 . Данные покрытия обладают высокой твердостью и износостойкостью, но в тоже время керамике свойственна существенная хрупкость, приводящая к разрушению покрытий при возникновении ударных нагрузок. Для повышения качества керамических покрытий весьма перспективным направлением является формирование металлокерамических композиций. На практике это реализуется термодиффузионным легированием керамики частицами цветных металлов, электронно-лучевым осаждением металлокерамических конденсатов [1 – 3] и газотермическим напылением покрытий плазменным или детонационным методами. Газотермическое напыление позволяет использовать для формирования металлокерамических покрытий, как предварительно плакированные частицы керамики (с металлической оболочкой), так и механические смеси порошковых материалов [4 – 5]. В данных композициях керамика обеспечивает высокий уровень твердости, а более мягкий металлический компонент служит связкой, что в целом обеспечивает рациональное соотношение свойств покрытий.

Плазменное напыление порошков в виде механических смесей является технологически менее трудоемким, более дешевым и производительным процессом, а так же дает возможность управления структурой покрытий в широких пределах путем применения композиций с различным составом.

Проведенные нами предварительные исследования по формированию подобных композиций подтвердили возможность их использования в качестве упрочняющих износостойких покрытий, способных воспринимать значительные нагрузки [6].

Целью настоящих исследований является анализ структуры и определение адгезионной прочности износостойких плазменных покрытий, сформированных из никель – и кобальт – керамической порошковых смесей.

Методика проведения экспериментов

Для проведения исследований использовались два варианта композиций исходных порошковых смесей с объемным соотношением основного и связующего компонентов – 4/1. Основным компонентом в обоих случаях служила оксидная керамика на основе Al_2O_3 (соответствующая по составу электрокорунду нормальному марки 15А), а связующими – никелевый порошок марки ПГ – 12Н – 01 для композиции 1 и кобальтовый порошок марки ПГН-ВЗК для композиции 2 [7, 8].

Приготовление механических смесей из порошков, с целью обеспечения однородности, реализовано путем механического перемешивания в специальной мельнице.

Нанесение плазменных покрытий на образцы производилось на установке "Киев – 7" плазмотроном ПУН – 3 мощностью 40 кВт. В качестве образцов использовались втулки, изготовленные из стали 20 с наружным и внутренним диаметрами соответственно 25 мм и 15 мм, шириной 12 мм. Процесс напыления осуществлялся за счет поступательного перемещения плазмотрона и вращения оправки с образцами. Заготовки предварительно подвергались процессу струйно-абразивной очистки частицами из электрокорунда. Образцы обрабатывались при одинаковых условиях, что позволило получить поверхности заготовок с шероховатостью в пределах $Rz = 60...80$ мкм.

Режимы напыления были приняты следующими: величина тока дуги плазмотрона – 120...180 А; напряжение – 150...160 В; расход плазмообразующего газа (воздуха) – 9...12 л/мин; дистанция напыления – 110 мм; скорость перемещения плазмотрона – 250 мм/мин; частота вращения оправки с образцами – 150...200 об/мин. Толщина слоя покрытия выдерживалась в пределах 500...540 мкм.

Металлографические исследования структуры выполнялись на оптическом микроскопе модели *NIKON Eclipse MA100*. Шлифы готовились по стандартной технологии, основанной на механическом шлифовании и полировании анализируемого материала. Микротвердость H_{μ} покрытий определялась на приборе *Wolpert Group 402MVD*. Нагрузка на алмазный индентор составляла 0,98 Н.

Оценка адгезионной прочности по методу "сдвига" производилась на специальной установке [9]. С помощью пресса образец с покрытием (шириной 6...7 мм) продавливался пуансоном через матрицу, при этом происходило разрушение и отрыв покрытия от основы. Значение прочности сцепления определялось через отношение нагрузки при разрушении к площади отрыва покрытия. Результаты опытов определялись как среднее арифметическое значение полученных данных по трем образцам.

Результаты и обсуждение

Обобщенный металлографический анализ исследуемых металлокерамических покрытий из механических смесей позволил получить характерную графическую структурную модель, отображающую специфику формирования данных композиций (рис. 1).

Следует отметить, что выявленная специфика по своей природе схожа с механизмом формирования однокомпонентных плазменных покрытий. Покрытие образуется путем наложения расплавленных частиц порошков, деформирующихся при соударении с основой или деформированными ранее частицами.

Характерной особенностью структуры является наличие ярко выраженных границ между отдельными компонентами смесей. Светлые частицы являются составляющими никелевого или кобальтового порошков, а серые частицы – оксидная керамика. В целом наблюдается взаимное обволакивание частиц порошков и низкая пористость (порядка 6...8%). Можно также отметить, что в многокомпонентных покрытиях процентное содержание керамики заметно меньше, чем в исходной смеси, что объясняется эффектом сегрегации компонентов при плазменном напылении покрытия.

Результаты определения микротвердости позволили установить её неравномерное распределение по структуре. Среднее значение микротвердости для частиц керамики составляет 12150...15840 МПа, для частиц никелевого порошка – 7750...9600 МПа и для кобальтового порошка – 11060...13800 МПа.

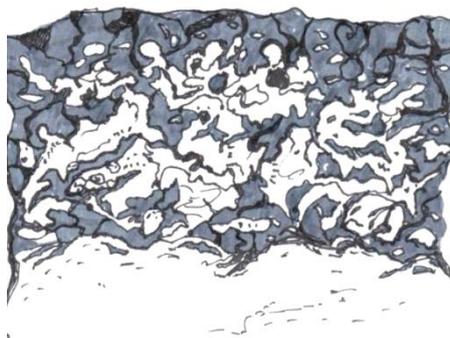


Рис. 1. Структурная модель металлокерамических покрытий

Исследование адгезионной прочности металлокерамических покрытий, нанесенных без применения переходного слоя (в отличие от традиционной технологии напыления керамики) имеет существенное значение в связи с присутствием частиц керамики на переходной границе.

На рис. 2 представлены результаты определения адгезионной прочности покрытий из никель – керамической (композиция 1) и кобальт – керамической (композиция 2) смесей в сравнении с покрытиями из стандартных порошков марок ПГ-12Н-01 и ПГН-ВЗК.

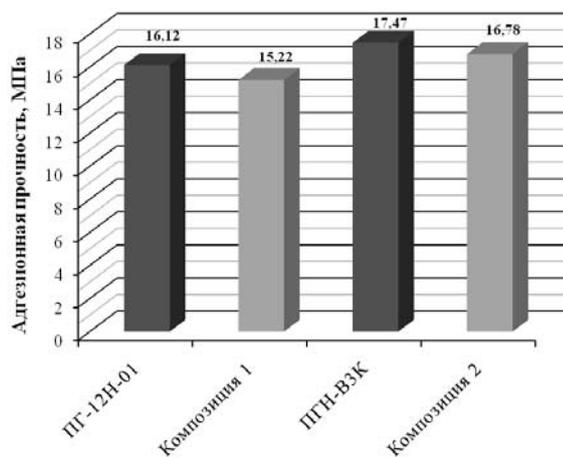


Рис. 2. Диаграмма результатов оценки адгезионной прочности покрытий

Из анализа полученных результатов следует, что адгезионная прочность исследуемых композиций несколько ниже (около 4...6 %) по сравнению с адгезионной прочностью покрытий из стандартных порошков. Это объясняется формированием структуры покрытий с иным количественным соотношением компонентов, отличающимся от исходных механических смесей, вследствие существующего эффекта сегрегации порошковых частиц в процессе плазменного напыления.

Очевидно, что снижение адгезии так же связано и с наличием частиц оксидной керамики на переходной границе. Однако, учитывая численные значения прочности сцепления исследуемых металлокерамических композиций можно предположить, что в целом они обладают достаточной работоспособностью.

Выводы

В результате проведенных исследований получена графическая структурная модель, отображающая специфику формирования металлокерамических покрытий из механических смесей. Определены одни из основных показателей качества для напыленных покрытий. Исследуемые композиции в целом обладают низкой пористостью и неравномерным распределением микротвердости в структуре покрытия, а так же приемлемой адгезионной прочностью. Немаловажным фактором в технологии нанесения данных покрытий является отсутствие необходимости в операции напыления промежуточного слоя.

Формирование плазменных металлокерамических покрытий из механических смесей является весьма перспективным направлением, однако их промышленное применение требует проведения широкого комплекса дальнейших экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Технология получения композиционного материала на основе многофункциональной оксидной керамики / В.А. Оковитый, Ф.И. Пантелеенко, Т.Л. Талако, А.Ф. Пантелеенко // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2015. – № 2 (67). – С. 39 – 45.
2. Разработка технологических процессов получения оксидных покрытий с улучшенным комплексом свойств / М.А. Кардаполова и др. // *Вестник БГТУ. – Машиностроение*. – 2006. № 4 – С. 31 – 35.
3. Крушинская Л.А., Стельмах Я.А. Структура и некоторые свойства толстых конденсатов оксида алюминия, получаемых электронно-лучевым испарением и осаждением паровой фазы в вакууме // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*. – 2010. – т. 8, № 4. – С. 1003 – 1014.
4. Князьков В.Л., Петрова Е.Е., Назаров О.С. Повышение антифрикционных свойств деталей машин горнодобывающего оборудования, работающего в экстремальных условиях, методом детонационного напыления // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2015. – № 5 (36), Ч. 2. – С. 77 – 81.
5. Пузряков А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 357 с.
6. Сравнительные испытания износостойких плазменных покрытий, сформированных на базе механических смесей из различных порошковых материалов / Ю.С. Чесов, Е.А. Зверев, Н.В. Вахрушев, А.С. Ваганов // В сборнике: *Инновации в машиностроении — основа технологического развития России материалы VI международной научно-технической конференции*. – 2014. – С. 211 – 215.
7. Исследование структуры износостойких плазменных покрытий из механических смесей / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев Е.А., Н.В. Вахрушев // *Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета*. – 2015. – № 2 (80). – С. 96 – 105.

8. Структура износостойких плазменных покрытий из никель – керамической смеси / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, Н.В. Плотникова, Н.В. Вахрушев, А.С. Ваганов, И.В. Бандюров // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 405 – 409.
9. Исследование адгезионной прочности плазменных металлокерамических износостойких покрытий / В. В. Иванцовский, Е. А. Зверев, Н. В. Вахрушев, И. В. Бандюров // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 77 – 81.

QUALITY OF CERAMIC-METAL WEAR – RESISTANT PLASMA COATINGS

Ivancivsky V.V., D.Sc. (Engineering), Assistant Professor, e – mail: ivancivskij@corp.nstu.ru

Zverev E.A., C.Sc. (Engineering), e – mail: egor_z@ngs.ru

Vakhrushev N.V., Ph.D. student, e – mail: vah_nikit@mail.ru

Bredikhina A.N., Master student, e – mail: nyara.bredihina@yandex.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

One of the promising ways for improving the quality of wear-resistant plasma ceramic coatings through the application of multi-component mechanical mixtures of different powder materials has been considered. The generalized metallographic analysis of obtained ceramic-metal plasma coatings is carried out and the graphic structural model which reflects specifics of their formation is shown. Research results of micro-hardness and adhesion strength of coatings from nickel-ceramic and cobalt-ceramic mechanical mixes are presented. The adhesion strength of obtained ceramic-metal plasma coatings from mechanical mixtures is slightly lower in comparison with the adhesion strength of standard powder coatings. It is explained by specific structure of the resulting coatings. However, the adhesion strength value of ceramic-metal coatings is retained at the acceptable level to ensure the operability of machine parts.

Keywords: plasma coating, oxide ceramic, nickel powder, cobalt powder, micro-hardness, adhesion strength, mechanical mixtures.

УДК 621.9.048.6

**НАЗНАЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО
ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ
ТОНКОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ**

*РАХИМЯНОВ Х. М., доктор техн. наук, профессор,
СЕМЕНОВА Ю. С., канд. техн. наук,
АНДРОСОВ О. А., магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Андросов О.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: androsov.2012@stud.nstu.ru

Аннотация

В рамках данной работы были выявлены ограничения по назначению технологических режимов ультразвукового поверхностного пластического деформирования при обработке тонких покрытий. Рассмотрены условия получения регулярного микрорельефа, формируемого на обрабатываемой поверхности за счет перекрытия отпечатков инструмента в исследуемой области режимных параметров.

Ключевые слова: ультразвуковое пластическое деформирование, регулярный микрорельеф, режимы обработки.

Введение

В настоящее время для обеспечения специфичных эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей все чаще используются покрытия. При этом толщина покрытий, необходимая для выполнения рабочих функций, обычно невелика. Современные методы нанесения покрытий позволяют формировать слои толщиной в несколько десятков микрон [1 – 4]. В некоторых случаях эксплуатационные свойства рабочих поверхностей определяются степенью развитости поверхности, отвечающей за площадь контакта поверхности с окружающей средой [5], а также равномерностью распределения элементов топографии поверхности [6].

Одним из перспективных методов финишной обработки, направленным на формирование развитого регулярного микрорельефа, является ультразвуковое пластическое деформирование (УЗПД). Ультразвуковое пластическое деформирование (УЗПД) – это метод упрочняюще-отделочной обработки, сущность которого заключается в том, что обрабатываемая поверхность детали подвергается воздействию деформирующего инструмента, колеблющимся с частотой свыше 18 кГц [7 – 9]. За счет дискретного воздействия деформирующего инструмента, на обрабатываемой поверхности формируется регулярный микрорельеф в виде совокупности отдельных отпечатков. Упорядоченное расположение отдельных равномерно расположенных отпечатков формирует на обрабатываемой поверхности регулярный микрорельеф [1 – 13].

На формирование регулярного микрорельефа поверхности оказывают влияние деформационные и кинематические параметры обработки. К деформационным параметрам относятся - амплитуда, статическое усилие, частота ультразвуковых колебаний и диаметр деформирующего инструмента, к кинематическим – скорость вращения детали и подача инструмента.

В работах [7 – 11] представлены зависимости параметров микрорельефа от сочетания режимных параметров обработки при УЗПД, однако деформационное воздействие, оказываемое на поверхностный слой при описанных в данной работе режимах не позволяет применять их при обработке тонкослойных покрытий, поскольку глубина деформированного слоя будет превышать толщину покрытия. Это может привести к потере адгезионных свойств покрытия и изменить условия его контактирования с основным материалом. Поэтому при обработке тонкослойных покрытий следует применять щадящие режимы деформационного воздействия.

В связи с этим целью данной работы является выявление ограничений при назначении технологических режимов ультразвуковой обработки тонкослойных покрытий. Ограничения связаны с обеспечением формирования регулярного микрорельефа за счет перекрытия соседних отпечатков инструмента.

Выявление технологических ограничений

Для снижения деформационного воздействия на поверхностный слой следует назначать минимальные значения статического усилия, частоты и амплитуды ультразвуковых колебаний. При этом необходимо учитывать технологические возможности реального оборудования. Наиболее простым в управлении режимом является статическое усилие, так как оно обеспечивается грузом определенной массы. Управление амплитудой и частотой колебаний управлять сложнее. Так, для имеющейся установки значением частоты колебаний управлять не возможно, поскольку она фиксирована. Изменение амплитуды колебаний возможно осуществить за счет конструктивных изменений волновода.

Для проведения данных исследований использовалась установка на базе токарно-винторезного станка 1А616, описанная в работе [14], с некоторыми конструктивными изменениями. Схема установки, представленная на рис. 1, включает: корпус (поз. 1), внутри которого установлен пьезокерамический преобразователь, волновод-концентратор (поз. 2), деформирующий инструмент – индентор (поз. 3), вентилятор (поз. 4) и кабель (поз. 5), по которому передается высокочастотное напряжение в корпус. Основание всего приспособления устанавливается на суппорт станка и крепится болтами. Чтобы обеспечить постоянство статического усилия в момент обработки детали, выбрана упругая схема поджатия деформирующего инструмента к поверхности детали при помощи шариковых направляющих (поз. 6) и подвешенного через систему блоков груза (поз. 7) определенной массы.

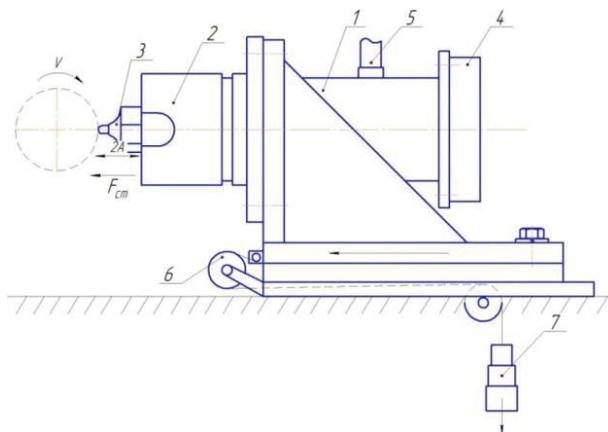


Рис. 1. Схема установки

С целью предотвращения от возможного перегрева пьезокерамического преобразователя, в комплекте с преобразователем предусмотрен вентилятор. При разработке конструкции установки, с учетом ограничения по высоте центров станка, вместо предусмотренного в комплекте вентилятора подобран более компактный фирмы «Jamicon» серии KF0715 – 01.

Для токарно-винторезного станка 1А616 параметры размеров обрабатываемых деталей будут ограничиваться высотой центров станка – 90 мм, рабочим ходом поперечного суппорта – до 195 мм и вылетом волновода с деформирующим инструментом – 80 мм. Как показано на рис. 2, продольный ход суппорта имеет ограничение, которое связано с шириной основания (поз. 1), закрепленного на суппорте станка. Крайнее рабочее положение деформирующего инструмента относительно левого торца детали регулируется специально установленным центром 3, обеспечивающим необходимый вылет.

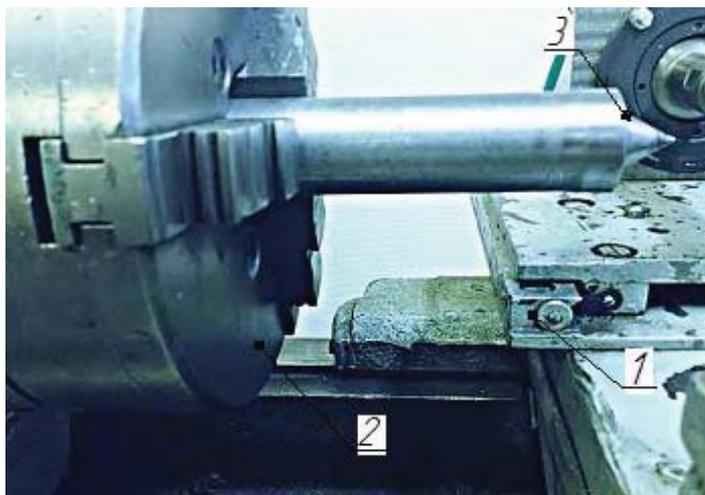


Рис. 2. Ограничение хода суппорта в продольном направлении

Рабочая часть деформирующего инструмента представляет собой сферический индентор, выполненный из синтетического алмаза диаметром 8 мм.

В лаборатории ультразвуковых технологий кафедры в комплекте с пьезокерамическим преобразователем используется ультразвуковой генератор фирмы «Ультразвуковая техника – Инлаб» ИЛ 10 – 0,1. Технические характеристики генератора: Выходная мощность, не менее 400Вт, потребляемая мощность, не менее 500 Вт, рабочая частота, 20 ± 5 кГц. Измерение амплитуды ультразвуковых колебаний на выходе пьезокерамического пакета, используемого в представленной установке, показали значение $2A \approx 3$ мкм.

Ограничения режимных параметров, обеспечивающих формирование регулярного микрорельефа, вызваны с одной стороны технологическими возможностями установки, а с другой – необходимостью обеспечивать отрыв ультразвукового инструмента от поверхности в процессе обработки.

Для выявления технологических ограничений режимов обработки, обеспечивающих, использовалась модель формирования регулярного микрорельефа поверхности при УЗПД, описанная в работе [11].

В качестве модельного материала выбрана Сталь 45 в состоянии поставки и закаленная. Соответствующие характеристики материалов, а также параметры установки, используемые в модели в качестве исходных данных, представлены в табл. 1.

Режимные параметры обработки

| Параметр | Значение | |
|---|------------------------------|--------------------------|
| | Сталь 45 (сост. поставки) | Сталь 45 (закаленная) |
| Частота колебаний ультразвукового инструмента (f), Гц | 20000 | |
| Диаметр деформирующего инструмента, м | 0,008 | |
| Скорость звука в материале, м/с | 5100 | |
| Площадь поперечного сечения волновода, м ² | 0,000225 | |
| Твердость обрабатываемого материала, МПа | 170 | 229 |
| Плотность обрабатываемого материала, кг/м ³ | 7826 | 7820 |
| Коэффициент Пуассона обрабатываемого материала | 0,26 | 0,28 |
| Модуль упругости обрабатываемого материала, МПа | 0,00002 | 0,0000207 |

В результате моделирования процесса обработки определяются параметры пластического отпечатка (глубина, диаметр), силовые параметры (максимально действующие усилие в момент времени и статическое усилие), а также значения моментов времени, углов колебаний и промежуточных перемещений деформатора.

График, представленный на рис. 3, показывает зависимость диаметров отпечатков $d_{отп}$ от статического усилия $F_{ст}$ для конструкционной стали 45 в закаленном и незакаленном состоянии.

Деформационные параметры определяют геометрию отпечатка деформирующего инструмента. По результатам моделирования можно сделать вывод, что с возрастанием статического усилия, прикладываемого к индентору, увеличивается диаметр отпечатка. Наибольшее статическое усилие, при котором будут формироваться отдельные отпечатки инструмента на обрабатываемой поверхности ограничивается условием отрыва инструмента от поверхности. Для незакаленной стали 45 при заданных условиях величина усилия составляет – $F_{ст} = 122$ Н, для закаленной стали – $F_{ст} = 138$ Н. При этом диаметры отпечатков будут соответственно равны $d_{отп.(незакал)} = 420$ мкм и $d_{отп.(закал)} = 415$ мкм. Минимальное усилие, при котором обеспечивается формирование полностью нового регулярного микрорельефа на поверхности детали, составляет – $F_{ст} = 50$ Н, при диаметре отпечатка $d_{отп} = 330$ мкм для незакаленной стали 45, и $F_{ст} = 53,5$ Н и $d_{отп} = 310$ мкм для закаленной стали. Это ограничение возникло из-за инерционности системы нагружения имеющейся установки.

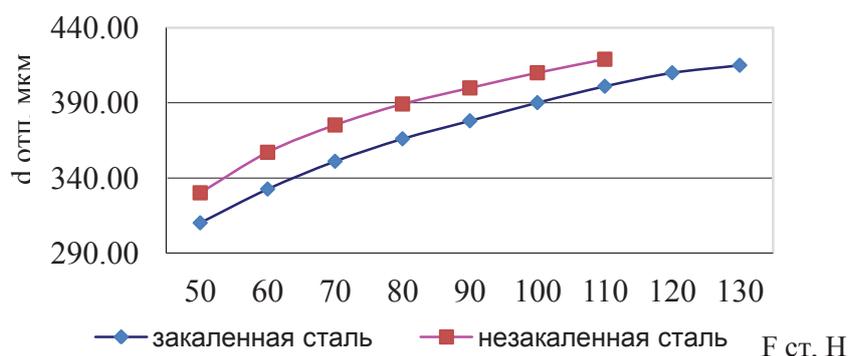


Рис. 3. График зависимости диаметра отпечатка $d_{отп}$ от статического усилия $F_{ст}$

Из графиков зависимости следует, чем выше твердость обрабатываемого материала, тем большее статическое усилие необходимо приложить к инструменту для формирования одного и того же диаметра отпечатка. Размер отпечатка, в свою очередь, будет определять максимально возможное расстояние между соседними ударами индентора в направлении скорости (V) и подачи (S), поскольку необходимо обеспечить перекрытие отпечатков для обеспечения полностью нового регулярного микрорельефа (рис. 4).

Таким образом, назначение кинематических параметров сводится к ограничению максимально возможного расстояния между соседними отпечатками в направлении V и S . Если допустить эти расстояния приблизительно равными и не учитывать смещение соседних отпечатков друг относительно друга на соседних витках, то можно составить систему неравенств:

$$\begin{cases} d_{omn} \geq S\sqrt{2} \\ d_{omn} \geq l_v\sqrt{2} \end{cases} \quad (1)$$

При этом значение скорости вращения детали будет определяться по формуле:

$$V = 60 \cdot l_v \cdot f \quad (2)$$

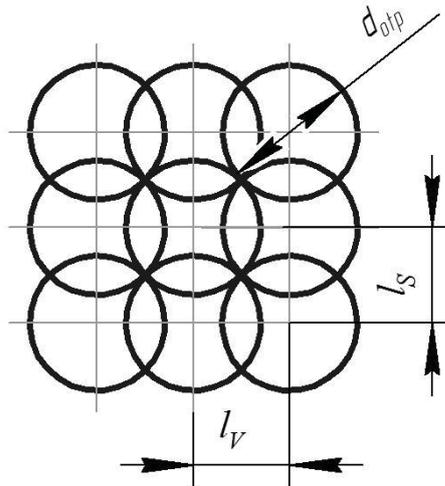


Рис. 4. Формирование микрорельефа поверхности при ультразвуковой обработке (l_s и l_v – расстояние между соседними ударами индентора в направлении подачи и скорости, соответственно)

Результаты и обсуждение

Исходя из расчетов диаметров отпечатков при обработке стали 45 в незакаленном и закаленном состоянии, получены максимальные значения величин подачи и скорости при обработке закаленной и незакаленной стали 45 пьезокерамическим инструментом с амплитудой колебаний $2A = 3$ мкм.

Так, максимальное значение подачи при обработке с максимальным статическим усилием закаленных сталей составляет 0,293 мм/об, при обработке незакаленных 0,297 мм/об. Максимальное значение скорости: 351 м/мин (для закаленных) и 356 м/мин.

Минимальное значение подачи ограничивается технологическими возможностями оборудования. Так на станке 1А62 значение минимальной подачи составляет 0,065 мм/об. Минимальное значение скорости определяется диаметром обрабатываемой детали и минимально возможным значением числа оборотов шпинделя.

Выводы

В результате теоретических исследований были определены области значений технологических параметров ультразвукового пластического деформирования цилиндрических деталей при использовании пьезокерамического инструмента.

Диапазон величин статического усилия при обработке стали 45 ограничен значениями 50 – 122 Н для незакаленной стали и 50 – 138 Н для закаленной. При этом величина диаметра единичного отпечатка колеблется от 0,310 мм до 0,420 мм. Для обеспечения регулярного микрорельефа за счет перекрытия соседних отпечатков в направлении скорости и подачи необходимо задавать значения скорости не более 350 м/мин, а подачи - не более 0,293 мм/об.

Список литературы

1. Исследование влияния отжига на адгезионную прочность покрытий, сформированных деформационным плакированием гибким инструментом / А.Н. Белый, К.Е. Белявин, М.А. Леванцевич // Инновации в машиностроении: сб. трудов VII Международной научно-практической конференции / под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово: КузГТУ, 2015, С. 429 – 432.
2. Осаждение защитных теплоотражающих покрытий с помощью плазмы магнетронного разряда / Асаинов О.Х., Баинов Д.Д., Ермолаев Р.А., Кривобоков В.П., Чернятина А.А. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т.57, № 3-3, С. 44 – 46.
3. Влияние тонкослойных нанопокровов на фреттинг-коррозию высоконагруженных сопряжений крупногабаритных деталей машин / Красный В.А., Максаров В.В., Вьюшин Р.В. // Металлообработка. 2013. № 5-6 (77-78), С. 63 – 67.
4. Эффективность методов прецизионной наплавки тонкослойных покрытий сжатой дугой / Ожегов Н.М., Ермаков С.А., Капошко Д.А. // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика. Материалы международной научно-практической конференции. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 14-15 апреля 2016 г. С. 72 – 79.
5. Формирование тонкослойного ванадийсодержащего покрытия блочных катализаторов очистки сбросных газов диоксида серы / Гришин А.Н., Лаврищева С.А., Нефедова Л.А. // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2011. № 12, С. 21 – 23.
6. Влияние режимов микродугового оксидирования и состава электролитов на получение тонкослойных оксидных покрытий с квазипериодическим расположением пор / Рамазанова Ж.М., Мамаев А.И. // Перспективные материалы. 2004. № 4, С. 82 – 85.
7. Рахимьянов Х. М., Семенова Ю. С. Прогнозирование геометрического состояния поверхности цилиндрических деталей из стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании // Обработка металлов: Технология. Оборудование. Инструменты. – 2011. – № 3 (52). – С. 11 – 17.
8. Surface State Control by Ultrasonic Plastic Deformation at the Final Machining Stage / К. М. Rakhimyanov, I. S. Semenova // Materials and Manufacturing Processes. – 2016. – 31 (6) – p. 764 – 769.

9. Технологическое обеспечение геометрических параметров качества поверхности при ультразвуковом пластическом деформировании / Х. М. Рахимьянов, Ю. С. Семенова // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. – 2012. - № 3 (56). – С. 33 – 36.
10. Повышение качества поверхностного слоя деталей с покрытиями малой толщины из нанокристаллических порошков ультразвуковым пластическим деформированием / Х. М. Рахимьянов, Ю. С. Семенова, М. А. Третьяков // *Обработка металлов: Технология. Оборудование. Инструменты*. – 2011. – № 3 (52). – С. 18 – 22.
11. Теоретическое обоснование области режимных параметров ультразвукового деформирования для обеспечения чистового и упрочняющего эффектов в обработке металлических материалов / Х. М. Рахимьянов., К. Х. Рахимьянов, Ю. С. Семенова, А. С. Еремина // *Системы. Методы. Технологии*. 2015. № 4 (28). – С. 55 – 61.
12. Technological peculiarities providing the surface quality parameters at ultrasonic surface hardening / K. Rakhimyanov, J. Semyonova, A. Eryomina // *Applied Mechanics and Materials*. - 2015. – Vol. 698: Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014. – P. 482 – 486.
13. Взаимосвязь кинематических и деформационных параметров ультразвукового пластического деформирования с геометрическими параметрами формируемого микрорельефа / Х. М. Рахимьянов., Ю. С. Семенова // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 2 (134). С. 16 – 19.
14. Установка для ультразвукового пластического деформирования по токарной схеме / Х. М. Рахимьянов, Ю. С. Семенова, М. А. Третьяков // *Наука. Технологии. Инновации* // *Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях*. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. Часть 3. С. 44 – 46 .

ASSIGNMENT MENT OF TECHNOLOGICAL MODE OF ULTRASONIC SURFACE HARDENING OF PARTS WITH THIN-LAYER COATINGS

Rakhimyanov Kh. M., D.Sc. (Engineering), professor, e – mail: x.rakhimyanov@corp.nstu.ru
Semyonova Yu.S., C.Sc. (Engineering), Associate professor, e – mail: yu.semenova@corp.nstu.ru
Androsov O.A., Master student, e – mail: androsov.2012@stud.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, prospekt K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

Within the framework of this work, limitations in assignment of technological mode for ultrasonic surface hardening when finishing the details with thin coatings are revealed. The conditions for provision a regular microrelief formed on the processed surface due to overlapping of the tool imprints are considered in the investigated range of processing mode.

Keywords: ultrasonic surface hardening, regular microrelief, processing mode.

ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ДЕФОРМАЦИИ И ЗАПАСА ПЛАСТИЧНОСТИ С ПАРАМЕТРАМИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ

*БЛЮМЕНШТЕЙН В. Ю., доктор техн. наук, профессор,
МИРОШИН И. В., канд. техн. наук,
ПЕТРЕНКО К. П., канд. техн. наук
(КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия)*

Мирошин И.В. – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28,
Кузбасский государственный технический университет,
е – mail: imiroshin@rambler.ru

Аннотация

Приведены методика и результаты идентификации деформационных параметров методом акустической структуроскопии. Показано, что данный метод позволяет выделять этапы деформации металла. Представлена связь между поэтапно накопленной степенью деформации сдвига и коэффициентом затухания поверхностной акустической волны.

Ключевые слова: деформация, запас пластичности, акустическая эмиссия, акустическая структурометрия, коэффициент затухания.

Введение

Пластическое течение металла в процессах механической обработки изменяет физическое состояние поверхностного слоя (ПС) и в значительной мере влияет на его структуру и свойства [1 – 7]. Метод поверхностного пластического деформирования (ППД) получил широкое распространение для упрочняюще-чистовой обработки деталей машин благодаря интенсивному пластическому течению металла и созданию в поверхностном слое благоприятной шероховатости, упрочнения и сжимающих остаточных напряжений [8 – 10].

Повышение эффективности технологий механической обработки возможно путем учета технологического наследования (ТН). Существует несколько подходов к оценке влияния ТН на формирование показателей состояния поверхностного слоя. Механика технологического наследования (ТН), разработанная В.Ю. Блюменштейном, учитывает физическую картину накопления деформации и истощения запаса пластичности на стадиях жизненного цикла деталей машин [11]. Положения механики ТН автором рассматриваются на примере стадий резания, поверхностного пластического деформирования и эксплуатационного нагружения в условиях приложения циклических нагрузок. При этом каждая операция механической обработки и/или эксплуатации рассматривается как стадия нагружения; стадии нагружения выделяются по признакам завершенности программ нагружения (ПН) и описываются в категориях феноменологии накопления повреждений и разрушения в очаге пластической деформации (ОД). Очаг деформации формируется и трансформируется на каждой стадии жизненного цикла и является носителем наследственной информации; его форма, размеры и состояние полностью и адекватно определяются ранее накопленными свойствами. ТН представляется в категориях ненаследуемой (залечиваемой, непереносимой, обратимой) и наследуемой (незалечиваемой, переносимой, необратимой) поврежденности или в категориях степени истощения запаса пластичности Ψ (СИЗП).

Использование деформационных параметров механики технологического наследования позволяет оценить формирование и трансформацию состояния металла поверхностного слоя не только в процессе его обработки, но и при последующем усталостном нагружении детали. Исследования показали, что получить определенное (одинаковое) значение СИЗП можно, нагружая поверхностный слой по различным программам, что существенно изменяет эксплуатационные свойства деталей машин [11]. Деформационные параметры наследуемого состояния поверхностного слоя сложно определять на каждой стадии технологического процесса и эксплуатации; в то же время физический характер теории ТН позволяет использовать для оценки накопленных свойств поверхностного слоя физические методы контроля.

Анализ показал, что наиболее адаптированными для решения таких задач являются акустические методы. При этом активные акустические методы основаны на излучении и приёме упругих волн, пассивные – только на приёме волн, источником которых служит сам контролируемый объект. Пассивный метод акустико-эмиссионный (АЭ) предполагает, что объект контроля должен находиться в динамике, чтобы излучать сигнал [12 – 16]. Метод прохождения, относящийся к активным акустическим методам, лишен данного недостатка. Он дает возможность контролировать состояние объекта на различных пройденных этапах его жизненного цикла, оценивая накопленную поврежденность и позволяя прогнозировать остаточный ресурс.

В настоящее время акустические методы применяют в двух основных направлениях: для неразрушающего контроля самых разнообразных объектов и в качестве эффективного метода физических исследований [17 – 28]. В последнее время значительное количество работ посвящено использованию акустических методов для контроля технологических факторов в процессе обработки [29 – 36]. Большая часть из них относится к контролю износа режущей кромки инструмента, оценке влияния параметров механической обработки на акустические сигналы для выбора режимов, обеспечивающих максимальную стойкость инструмента или требуемые параметры микрогеометрии поверхностного слоя. Отдельные работы имеют отношение к контролю формирования стружки, оценке взаимосвязей сигналов АЭ с величиной натяга и / или усилием при ППД.

Влияние износа режущей кромки на частотный спектр сигнала АЭ при различных скоростях резания исследовано в работе А. В. Кибальченко [29]. Связь скорости счета акустической эмиссии с натягом деформирующих инструментов при ППД была получена в работе В. В. Николаева и В. А. Фирсова [30]. J. Barry и G. Вугне проводили исследования сигналов акустической эмиссии при точении закаленных сталей [31]. Установлено, что среднее квадратическое значение сигналов АЭ при обработке закаленных сталей может быть до двух порядков выше, чем при обработке мягких сталей перлитного класса. По мнению авторов, это происходит вследствие образования элементной стружки и периодическому быстрому высвобождению энергии упругой деформации в зоне сдвига.

Aamer Jalil Mian, Nicholas Driver и Paul T. Mativenga исследовали взаимосвязь сигналов акустической эмиссии с процессом стружкообразования при микрофрезеровании различных материалов: стали, меди, алюминиевого, титанового сплавов и др. [32]. В процессе исследования с помощью вэйвлет-преобразования установлена связь между механизмом образования стружки и энергией разложенных частотных диапазонов сигналов АЭ. Показано, что энергия сигналов АЭ, разложенная по частотным диапазонам, может быть использована для идентификации микротрещин и сдвиговых микропор в процессе образования стружки при микрорезании. M. Prakash, M. Kanthababu, K. P. Rajurkar проводили исследование влияния износа инструмента и механизма стружкообразования при микрофрезеровании алюминиевого сплава с помощью АЭ [33]. Полученные сигналы АЭ подвергались анализу во временной и частотной областях на основе технологии быстрого преобразования Фурье и дискретного вейвлет – преобразования. Микрофрезерование глубиной резания 50 мкм осуществлялось двухканальной микрофрезой из твердого сплава диаметром 0,5 мм с радиусом округления режущей кромки 1,93 мкм.

В результате установлено, что сигналы АЭ (их среднеквадратическое значение) чувствительны к образованию нароста на режущей кромке инструмента; обнаружена устойчивая корреляция между амплитудой сигналов АЭ и образованием различных типов стружек.

Alan Hase, Masaki Wada, Toshihiko Koga и Hiroshi Mishina провели исследования по чистовому точению инструментальной стали [34]. В результате установлено, что процесс стружкообразования, тип образующейся стружки и угол скалывания оказывают значительное влияние на сигналы АЭ. В частности, повышение твердости материала приводит к значительному (в несколько раз) усилению сигналов АЭ. Также отмечается устойчивая корреляция между сигналами АЭ и шероховатостью обработанной поверхности. Амплитуда сигналов АЭ при образовании элементной стружки выше, чем при образовании сливной. С. Beggan, M. Woulfe, P. Young и G. Byrne при точении образцов из низкоуглеродистой стали и варьировании скорости резания и подачи установили связь между параметрами шероховатости и сигналами АЭ [35]. Авторы отмечают, что указанное обстоятельство может быть использовано для прогнозирования и управления качеством поверхностного слоя непосредственно в процессе обработки. В исследовании по чистовому точению алюминиевого сплава резами с пластинами из твердого сплава и монокристалла природного и искусственного алмаза L. N. Devin и S. V. Ruchev разделяли сигналы АЭ: от формирования стружки и от трения между обрабатываемой поверхностью и задней поверхностью инструмента при отключении подачи [36]. Установлено отличие между сигналами АЭ непосредственно от процесса резания и от трения. Также экспериментально установлено, что наиболее высокий уровень сигнала АЭ от образования стружки формируется при точении пластинами из твердого сплава, самый низкий уровень – при точении природными алмазами.

Конечной целью использования акустических сигналов у всех вышеназванных исследователей является выбор оптимальных параметров механической обработки, обеспечивающих максимальную стойкость режущего инструмента или требуемую макро- и микрогеометрию поверхности. Рассмотренные подходы при использовании акустических методов исследований в процессах механической обработки не позволяют оценить поверхностный слой детали с точки зрения его внутреннего состояния, определяющего эксплуатационные свойства изделия. По мнению авторов, связь акустических сигналов с деформационными параметрами позволяет в комплексе охарактеризовать поверхностный слой деталей машин при обработке. Определение деформационных параметров и СИЗП, как было отмечено выше, при механической обработке резанием и ППД представляет определенные трудности, ввиду сложного немонотонного характера накопления деформаций. Согласно механике ТН в очагах пластической деформации материальная частица ПС проходит три последовательных участка, на границах которых изменяется вид напряженного состояния. В итоге датчик прибора АЭ фиксирует итоговое физическое состояние металла, не отражая влияние истории нагружения металла поверхностного слоя [37 – 39]. Поэтому взаимосвязи деформационных параметров механики с акустическими сигналами вначале были исследованы на примере более простых процессов сжатия цилиндрических образцов [40]. Были получены устойчивые зависимости скорости счета сигнала акустической эмиссии от накопленной степени деформации сдвига для условий простого одноэтапного нагружения. Для случая простого двухэтапного нагружения установлено влияние предварительного этапа на накопление скорости счета сигнала акустической эмиссии в процессе повторного деформирования.

Для немонотонного процесса проведены исследования по идентификации деформации и СИЗП; дополнительному нагружению на прессе Бринелля подвергали образцы из сплава Д16Т, полностью исчерпавшие запас пластичности после предварительного нагружения по разным программам, с одновременной регистрацией сигналов акустической эмиссии процесса [41].

Методика экспериментального исследования

Исследования авторов получили развитие в направлении идентификации деформации и СИЗП на примере образцов, подвергнутых пластической деформации по различным траекториям нагружения.

Исследовались образцы, описанные в работе [42], и предоставленные Ю. Г. Калпиным с соавторами для оценки акустических сигналов.

Ю. Г. Калпин с соавторами исследовали образцы из алюминиевого сплава Д16Т размерами 20x20x30 мм. Образцы подвергали холодной пластической деформации по различным траекториям с повторностью опытов не менее 5 (табл. 1).

Испытания проводили в щелевом штампе; условия испытания таковы, что при переходе от одного этапа деформации к другому выполняются следующие требования: показатель напряженного состояния (ПНС) $K = -1/\sqrt{3}$ и показатель Лодэ – Надаи $\mu_\sigma = 0$ были одинаковыми на обоих этапах деформации; деформация практически однородна, объем образца не изменяется. Деформация была двухэтапной и к окончанию второго этапа получали значение $\Psi = 1$. При этом накопленная деформация как поэтапная, так и суммарная, была различной.

Деформация рассчитывалась по формуле:

$$\varepsilon_i = -\frac{2}{\sqrt{3}}\varepsilon_3, \quad (1)$$

где ε_3 – деформация сжатия, $\varepsilon_3 = \frac{\Delta l}{l}$.

Степень исчерпания запаса пластичности оценивали по формуле:

$$\Psi = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_p} \quad (2)$$

где ε_p – деформация, накопленная к моменту разрушения.

Показатель напряженного состояния оценивали как

$$K = \frac{\sigma}{\sigma_i}, \quad (3)$$

где σ – среднее нормальное напряжение, σ_i – интенсивность напряжений.

Характерный вид образцов после испытаний представлен на рис. 1.

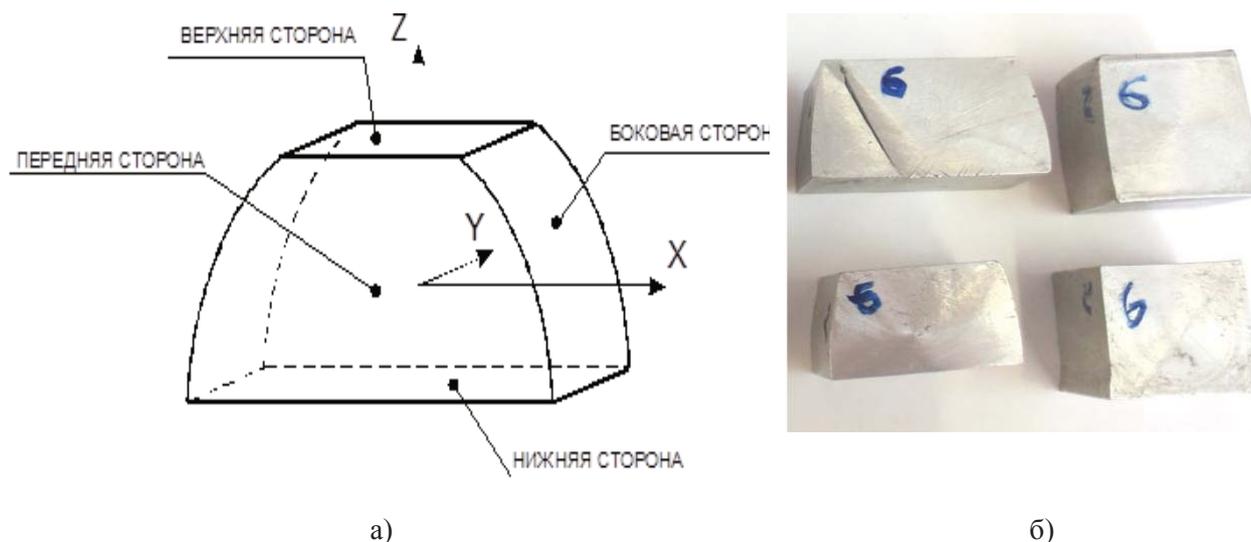


Рис. 1. Образцы после испытания в щелевом штампе:
а) схема; б) фото

Влияние траектории деформации при нагружении на акустические параметры исследовали с помощью системы «АСТРОН» [43] (рис. 2). Основная область применения данной системы – исследование структурных особенностей материалов технических объектов, оценка их физико-механических характеристик и напряженно – деформированного состояния.

В основу работы системы положен способ регистрации серии отраженных импульсов упругих волн, возбуждаемых в объекте контроля пьезоэлектрическим преобразователем и последующей ее обработки программными средствами.

Сформированный с заданной длительностью зондирующий импульс после усиления поступает на преобразователь электрического сигнала в механические колебания, возбуждая в объекте контроля упругие волны. Пройдя через объект контроля, данные импульсы за счет пьезоэффекта создают в приемнике электрические импульсы, которые после дополнительного усиления поступают на аналого-цифровой преобразователь. Через устройство ввода-вывода цифровой код передается в процессорный модуль, осуществляющий его преобразование и вывод визуальной информации о форме отраженных импульсов на экран (рис. 3). Расчет временных интервалов и величин размахов импульсов производится программно.

В качестве поверхностной акустической волны (ПАВ) использовали волны Рэлея, определяемые типом датчика. Фазовая скорость таких волн направлена параллельно поверхности, а их энергия локализована в поверхностном слое, в связи с чем они наиболее чувствительны к поверхностным дефектам.

Прибор позволяет регистрировать следующие параметры: R – время задержки поверхностной акустической волны, нс; $K_{зат}$ – коэффициент затухания ПАВ, 1/мкс; величину амплитуды ПАВ.

Время задержки R определяется длиной пути, проходимого упругими волнами от входного преобразователя до выходного, и скоростью распространения ультразвука. Коэффициент затухания определяется как величина, обратная времени, за которое амплитуда волны уменьшается в e (2,71828) раз.

Экспериментальные исследования показали, что оптимальной величиной для шага дискретизации является величина 5 – 10 нс, что позволяет в рамках решаемых задач обеспечить относительную погрешность определения временных параметров на уровне 10^{-5}

Результаты испытаний на пластичность призматических образцов в щелевом штампе [42]

| Номер и описание траектории | Накопленная деформация ε_i | | | Степень использования запаса пластичности ψ | | |
|--|--|---------------|--------------------------------|--|---------------|--------------------------------|
| | На 1-ом этапе | На 2-ом этапе | Суммарная к моменту разрушения | На 1-ом этапе | На 2-ом этапе | Суммарная к моменту разрушения |
| 1. Одноэтапное нагружение образцов с размерами 20x20x30 до разрушения; сжатие осуществляется по оси z вдоль размера 30 мм | 0,4447 | - | 0,4447 | 1,0000 | - | 1,0000 |
| 3. Осадка образца по оси z до величины ε_1 ; поворот вокруг оси u на 90°; повторная осадка до разрушения | 0,2821 | 0,2319 | 0,5140 | 0,6344 | 0,5215 | 1,1559 |
| 4. Осадка образца по оси z до величины ε_1 ; поворот вокруг оси u на 90°; поворот вокруг оси z; повторная осадка до разрушения (поворот главных осей деформации на 120° вокруг линии, равнонаклоненной к главным осям) | 0,2905 | 0,1309 | 0,4202 | 0,6534 | 0,2944 | 0,9478 |
| 5. Осадка образца по оси z до размера 20 мм; обработка образца по оси x до размера 20 мм; поворот вокруг оси z на 90°; повторная осадка до разрушения | 0,1752 | 0,2814 | 0,4566 | 0,3940 | 0,6328 | 1,0268 |
| 6. Осадка образца по оси z до размера 20 мм; поворот вокруг оси x на 90°; повторная осадка до разрушения | 0,2853 | 0,1440 | 0,4293 | 0,6415 | 0,3238 | 0,9653 |
| 7. Осадка образца по оси z до величины ε_1 ; обработка образца по оси x до размера 20 мм; поворот вокруг оси z на 90°; поворот вокруг оси u на 90°; повторная осадка до разрушения | 0,2887 | 0,0941 | 0,3828 | 0,6492 | 0,2116 | 0,8608 |

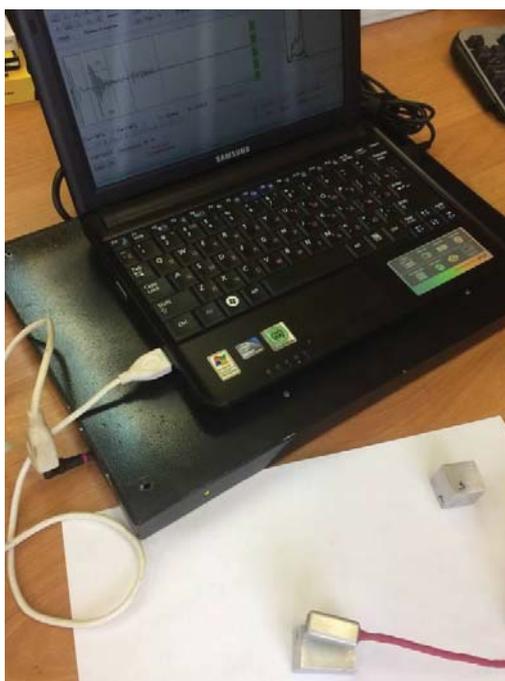


Рис. 2. Внешний вид системы «АСТРОН»



Рис. 3. Вид осциллограммы принятых импульсов

Процедура оценки физико-механических характеристик материала проводилась по следующей схеме:

- выбор акустических параметров, чувствительных к изменению физико-механических характеристик материала диагностируемых элементов;
- установление функциональных или корреляционных связей акустических параметров материала с его физико – механическими характеристиками в ходе обучающих экспериментов;
- оценка физико-механических характеристик материала на изучаемом образце.

Исследования проводились на шести сериях образцов, по 4 – 5 образцов в каждой серии. Серия соответствовала определенной траектории нагружения. Датчик устанавливали поочередно на каждую из шести поверхностей образца (рис. 4) и по максимальному значению коэффициента затухания ПАВ

определяли поверхность, полностью исчерпавшая запас пластичности. В дальнейшем для расчетов использовали только одно из шести значений.

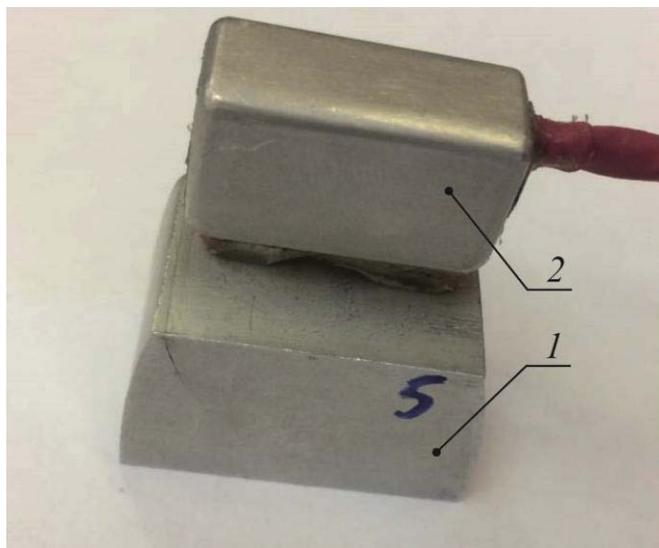


Рис. 4. Схема измерения: 1 – образец; 2 – датчик

Значения регистрируемых параметров, полученные для одного из образцов, деформированного по первой траектории, приведены в табл. 2. Порядковый номер соответствует стороне образца; величина амплитуды указана относительно оси абсцисс.

Таблица 2

Фрагмент таблицы с промежуточными результатами по регистрируемым параметрам

| № п/п | R , нс | $K_{зат}$, 1/мкс | Амплитуда, дБ | |
|-------|----------|-------------------|---------------|--------|
| | | | Верхняя | Нижняя |
| 1 | 5082 | 0,053 | 153 | 180 |
| 2 | 5065 | 0,069 | 131 | 186 |
| 3 | 5103 | 0,08 | 129 | 169 |
| 4 | 5078 | 0,111 | 133 | 123 |
| 5 | 5094 | 0,113 | 127 | 125 |
| 6 | 5075 | 0,128 | 112 | 123 |

Результаты и обсуждение

Результаты измерений акустических сигналов приведены в табл. 3. В зависимости от траектории нагружения, определяемой поэтапной и суммарной деформацией ε_i , получены значения коэффициента затухания ПАВ $K_{зат}$ – максимального для каждого из образцов и итогового среднего значения по сериям.

Таблица 3

Значения степени деформации и соответствующие значения коэффициента затухания ПАВ по сериям экспериментальных образцов

| № серии | ε_1 | ε_2 | ε_Σ | $K_{зат_1}$ | $K_{зат_2}$ | $K_{зат_3}$ | $K_{зат_4}$ | $K_{зат_5}$ | $\bar{K}_{зат}$ |
|---------|-----------------|-----------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|
| 1 | 0,44 | | 0,44 | 0,376 | 0,304 | 0,282 | 0,309 | 0,275 | 0,3092 |
| 3 | 0,28 | 0,23 | 0,51 | 0,444 | 0,435 | 0,444 | 0,437 | 0,323 | 0,4166 |
| 5 | 0,18 | 0,28 | 0,46 | 0,316 | 0,402 | 0,356 | 0,201 | - | 0,31875 |
| 6 | 0,28 | 0,14 | 0,42 | 0,266 | 0,337 | 0,278 | 0,297 | - | 0,2945 |
| 7 | 0,29 | 0,09 | 0,36 | 0,334 | 0,257 | 0,311 | 0,205 | - | 0,27675 |
| 8 | 0,31 | 0,79 | 1,1 | 0,504 | 0,557 | 0,507 | 0,438 | 0,518 | 0,5048 |

Проведенный анализ показал, что коэффициент затухания $\bar{K}_{зат}$ ПАВ изменяется в полном соответствии со значениями накопленной поэтапно степенью деформации ε_Σ (рис. 5).

Таким образом, после комплекса акустических исследований было установлено, что траектория деформации при нагружении оказывает существенное влияние на акустические характеристики ПАВ, в частности на коэффициент затухания рэлеевских волн.

Статистическая обработка полученных данных показала, что существует зависимость между коэффициентом затухания акустического сигнала и суммарной деформацией сдвига, характеризующей программу нагружения ПС, вид которой приведен на рис. 6

Результаты испытаний образцов алюминиевого сплава, исчерпавших запас пластичности, показывают, что такой информативный параметр поверхностной акустической волны, как коэффициент затухания, отражает изменения в траекториях (программах) нагружения данных образцов. Это означает, что анализ параметров акустических сигналов позволяет контролировать технологические режимы, используемые в каждом конкретном случае обработки, выявляя накопленную деформацию. Это, в свою очередь, позволяет прогнозировать остаточный ресурс изделия.

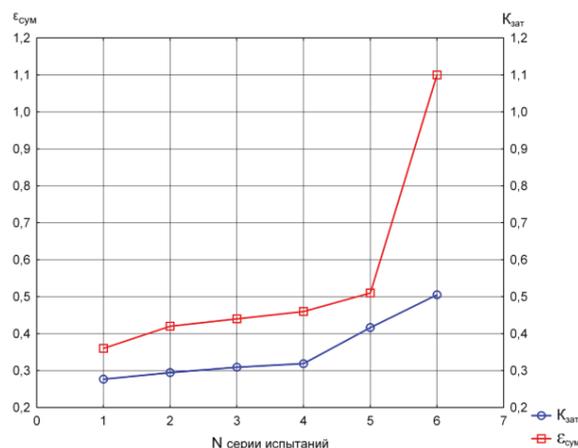


Рис. 5. Изменение коэффициента затухания акустического сигнала и суммарной деформации (номер серии испытаний приведен в порядке увеличения)

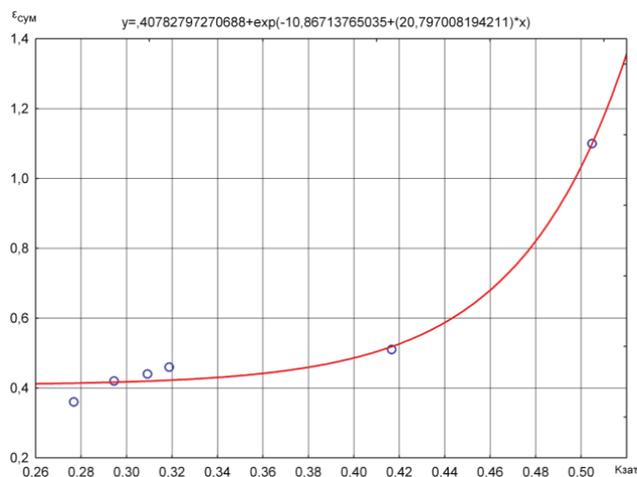


Рис. 6. Взаимосвязь коэффициента затухания и суммарной деформации

Выводы

1. Для упрочняющей обработки актуальной является задача поиска и адаптации критериев оценки пластичности обрабатываемого материала, что позволяет в полной мере использовать технологические возможности данного метода для обеспечения требуемого ресурса изделия.
2. На каждой стадии технологического процесса и эксплуатации сложно определять деформационные параметры наследуемого состояния поверхностного слоя; необходимо использовать для их оценки методы контроля, отражающие физическую сущность происходящих в поверхностном слое процессов. Анализ показал, что наиболее адаптированными для решения таких задач являются акустические методы.
3. Известно, что исчерпать запас пластичности поверхностного слоя можно различными путями, что влияет на ресурс изделия. Задача идентификации нагружения поверхностного слоя по разным программам, особенно в таких сложных случаях немонотонного нагружения, как обработка резанием и поверхностным пластическим деформированием, представляет определенные трудности, в том числе и физическими методами контроля.
4. Эффективным экспериментальным методом изучения влияния немонотонности деформации на пластичность является проведение двухэтапных испытаний, когда на каждом из этапов нагружение является простым. В этом случае траектория деформации представляется в виде ломаной линии, а немонотонность оценивается углом между ее отрезками. Многие проблемы испытания на пластичность при ломаных траекториях деформации можно решить, используя для осадки целевой штамп. Именно таким образом полученные образцы были использованы для исследований, поскольку для них, виду чистоты эксперимента были однозначно идентифицированы деформационные параметры.
5. Используемая методика неразрушающего контроля основана на уникальных свойствах ультразвуковых волн выявлять множество рассеянных микрповреждений, размеры каждого из которых меньше порога чувствительности многих других методов испытаний. При исследовании взаимосвязей параметров механического состояния материала и параметров ультразвукового сигнала использовался релейский датчик, позволяющий локализовать поврежденность в поверхностном слое. Анализ результатов эксперимента показывает высокую чувствительность акустического метода к определению изменений параметров микрповрежденности.

6. Установлено, что траектория деформации при нагружении, характеризующая ее программу, оказывает существенное влияние на акустические характеристики ПАВ, в частности на коэффициент затухания рэлеевских волн.
7. Показано, что метод акустической структуроскопии позволяет контролировать накопление поврежденности в поверхностном слое материала в зависимости от программы его нагружения, выявляя накопленную степень деформации сдвига.
8. Результаты исследований могут быть использованы при разработке методики контроля формирования поверхностного слоя при обработке резанием и ППД, позволяющей определять наследуемые параметры качества, включая деформации и степень исчерпания запаса пластичности с целью прогнозирования долговечности деталей машин, работающих в условиях усталостного нагружения.

Список литературы

1. Старков В. К. Физика и оптимизация резания металлов. М.: Машиностроение, 2009. 640 с.
2. Dinesh G. Thakur, B. Ramamoorthy, L. Vijayaraghavan. Effect of cutting parameters on the degree of work hardening and tool life during high-speed machining of Inconel 718, *Int J Adv Manuf Technol* (2012) 59:483–489 DOI 10.1007/s00170-011-3529-6, pp. 483-489.
3. Xiaoping Ren, Zhanqiang Liu. Influence of cutting parameters on work hardening behavior of surface layer during turning superalloy Inconel 718, *Int J Adv Manuf Technol* DOI 10.1007/s00170-016-8350-9, pp.1-9.
4. Gábor Csernák, Zoltán Pálmai. Exploration of the chaotic phenomena induced by fast plastic deformation of metals, *Int J Adv Manuf Technol* (2009) 40:270–276 DOI 10.1007/s00170-007-1348-6, pp. 270-276.
5. Jihua Wu, Zhanqiang Liu. Modeling of flow stress in orthogonal micro-cutting process based on strain gradient plasticity theory, *Int J Adv Manuf Technol* (2010) 46:143–149 DOI 10.1007/s00170-009-2049-0, pp.143-149.
6. W. J. Zong, Z. M. Cao, C. L. He, T. Sun. Critical undeformed chip thickness of brittle materials in single point diamond turning, *Int J Adv Manuf Technol* (2015) 81:975–984 DOI 10.1007/s00170-015-7264-2, pp. 975-984.
7. Wee Keong Neo, A. Senthil Kumar, Mustafizur Rahman A review on the current research trends in ductile regime machining, *Int J Adv Manuf Technol* (2012) 63:465–480 DOI 10.1007/s00170-012-3949-y, pp. 465-480.
8. Смелянский В. М. Механика упрочнения поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
9. Технологии и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. В 2-х томах. Т. 1. / под общ. ред. А. Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2014. 480 с.
10. Технологии и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. В 2-х томах. Т. 2. / под общ. ред. А. Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2014. 444 с.
11. Блюменштейн В. Ю., Смелянский В. М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение-1, 2007. 400 с.
12. Грешников В. А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия. М.: Издательство стандартов, 1976. 277 с.
13. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / под ред. К. Б. Вакара. М.: Атомиздат, 1980. 216 с.
14. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Ивлиев и др. Новосибирск: Наука, 2011. 272 с.
15. Акустическая тензометрия и структуроскопия железнодорожных колес / под ред. В. В. Муравьева. Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2014. 180 с.

16. V. R. Skal's'kyi, O. E. Andreikiv, O. M. Serhienko Investigation of the plastic deformation of materials by the acoustic emission method (review), *Materials Science*, Vol. 39, No. 1, 2003, pp. 86-106.
17. Хлыбов А. А. Обеспечение эксплуатации крупногабаритных конструкций по техническому состоянию. Н. Новгород: НГПУ, 2008. 136 с.
18. Vasil'ev V. G., Uglov A. L., Khlybov A. A. Acoustic method for monitoring the state of VVER vessels // *Atomic Energy*, 2009. V.106, №1, pp. 37-42.
19. Patrik Dobroň, Daria Drozdenko, Sangbong Yi, and Jan Bohlen. An Acoustic Emission Study of Deformation Behavior of Wrought Mg Alloys. *The Minerals, Metals & Materials Series*, DOI 10.1007/978-3-319-52392-7_84, pp. 613-617.
20. P.A. Vanniamparambil, U. Guclu, A. Kontsos. Identification of Crack Initiation in Aluminum Alloys using Acoustic Emission, *Experimental Mechanics* (2015) 55:837–850 DOI 10.1007/s11340-015-9984-5, pp. 837-850.
21. Toshihiro Ohtani. Acoustic Damping Characterization and Microstructure Evolution during High-Temperature Creep of an Austenitic Stainless Steel, *Metallurgical and materials transactions a volume 36A*, november 2005, pp. 2967-2977.
22. Дробот Ю. Б., Лазарев А. М. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом. М.: Изд-во стандартов, 1987. 128 с.
23. Кузнецов Н. С. Теория и практика неразрушающего контроля изделий с помощью акустической эмиссии. М.: Машиностроение, 1998. 96 с.
24. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьев и др.; под ред. Л. Н. Степановой. М.: Радио и связь, 2000. 280 с.
25. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Н. А. Семашко, В. И. Шпорт, Б. Н. Марьин и др. М.: Машиностроение, 2002. 240 с.
26. Углов А. Л., Ерофеев В. И., Смирнов А. Н. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. М.: Наука, 2009. 278 с.
27. Никитина Н. Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛИАМ, 2005. 208 с.
28. Полупан А. В. Ультразвуковой контроль поверхностными волнами: практ. пособие. М.: Спектр, 2014. 119 с.
29. Кибальченко А. В. Применение метода акустической эмиссии в условиях гибких производственных систем. М.: ВНИИТЭМР, 1986. 56 с.
30. Акустическая эмиссия как фактор снижения трудоемкости при оптимизации ППД цилиндрических деталей / В. В. Николаев, В. А. Фирсов // Сб. науч. тр. ТПИ. Тула, 1988. С. 85-89.
31. J. Barry, G. Byrne. Study on acoustic emission in machining hardened steels Part 1: acoustic emission during saw-tooth chip formation, *Proc Instn Mech Engrs Vol 215 Part B*, 2001, pp. 1549-1559.
32. Amer Jalil Mian, Nicholas Driver, Paul T. Mativenga. Chip formation in microscale milling and correlation with acoustic emission signal, *Int J Adv. Manuf. Technol.* (2011) 56, pp. 63-78.
33. M. Prakash, M. Kanthababu, K. P. Rajurkar. Investigations on the effects of tool wear on chip formation mechanism and chip morphology using acoustic emission signal in the microendmilling of aluminum alloy, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, DOI 10.1007/s00170-014-6562-4.
34. Alan Hase, Masaki Wada, Toshihiko Koga, Hiroshi Mishina. The relationship between acoustic emission signals and cutting phenomena in turning process, *Int J Adv. Manuf. Technol.* (2014) 70, pp. 947-955.
35. C. Beggan, M. Woulfe, P. Young, G. Byrne. Using Acoustic Emission to Predict Surface Quality, *Int J Adv Manuf Technol* (1999) 15, pp. 737-742.
36. L. N. Devin, S. V. Rychev An Experimental Study of the Influence of Tool Material and Fine Turning Conditions on the Level of Acoustic Emission Signals, *Journal of superhard materials*, Vol. 38, No. 1, 2016, pp. 51-57.

37. V. Y. Blumenstein, I. V. Miroshin. Acoustic Emission Method Application to Control Heritable Mechanical State of the Detail Surface Layer on Cutting and Plastic Sheet Warping. Fundamental and Applied technological Problems of Machine Building. Technology – 2002. Materials International Scientific. Technical Internet Conference in Oryol, March 1 September 10 2002/Under general editorship of Prof., Doc. Tech. Sc. V.A. Golenkov, Prof., Doc. Tech. Sc. Yu. S. Stepanov. Oryol, 2003. pp. 455-458.
38. Блюменштейн В. Ю., Кречетов А. А., Мирошин И. В. Расчет циклической долговечности упроченных деталей машин по сигналам акустической эмиссии // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009, №12. С. 5-10.
39. Valeriy Yu. Blumenstein, Fyodor I. Panteleenko, Igor V. Miroshin, Oleg A. Ostanin. Acoustic and Emission Control of the Hereditary Stress and Strain State of the Metal Surface Layer during Cutting and Surface Plastic Deformation. Chapter 1: Innovative Technologies of Materials Processing in Mechanical Engineering. Applied Mechanics and Materials Vol. 788 (2015) pp. 3-10.
40. Блюменштейн В. Ю., Мирошин И. В., Останин О. А. Оценка взаимосвязей феноменологических параметров металла с сигналами акустической эмиссии // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. №2. С. 44-50.
41. Мирошин И. В. Исследование влияния программы нагружения на сигналы акустической эмиссии // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. №11. С. 47-48.
42. Сопротивление деформации и пластичность при обработке металлов давлением / Калпин Ю. Г., Перфилов В. И., Петров П. А. и др. М.: Машиностроение, 2011. 244 с.
43. Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 2. Спектрально-акустический метод контроля / Н. В. Абабков, А. В. Бенедиктов, А. Н. Смирнов и др. // Вестн. КузГТУ. 2010. № 5. С. 101-106.

CORRELATION EVALUATION OF DEFORMATION AND PLASTICITY RESERVE WITH SIGNAL PARAMETERS OF ACOUSTIC STRUCTURE EXAMINATION

Blumenstein V. Yu., Doctor of Engineering, Professor, e – mail: Blumenstein@rambler.ru
Miroshin I. V., Candidate of Engineering, Associate Professor, e – mail: imiroshin@rambler.ru
Petrenko K. P., Candidate of Engineering, Associate Professor, e – mail: konst.petr@mail.ru

28, Vesennyaya str., Kemerovo, 650000, Russia, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

Abstract

In this article, technique and results of strain parameters identification by acoustic structure examination method are presented. It was shown, that above-mentioned method allows recognizing strain stage of metals. Relationship between step – by – step accumulated degree of shear deformation and surface acoustic wave damping ratio is revealed.

Keywords: deformation, plasticity reserve, acoustic emission, acoustic structure examination, damping ratio.

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СЛОЕВ Ti – TiC – TiB ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ
ВНЕВАКУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО – ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ**

*ЛЕНИВЦЕВА О. Г., канд. техн. наук,
ЧУЧКОВА Л. В., магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Ленивцева О.Г. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e – mail: lenivtseva_olga@mail.ru

Аннотация

Проведены исследования наплавленных слоев, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей содержащих титан и карбида бора на заготовках из титанового сплава ВТ1 – 0. Структура образцов исследовалась с использованием методов световой и растровой электронной микроскопии. Структурные исследования показали, что полученные материалы состоят из четырех зон: зоны наплавленного слоя, переходного слоя, зоны термического влияния и зоны с неизменной структурой титана. Толщина наплавленного слоя зависит от параметров обработки и составляет 3,0...3,2 мм. Основными упрочняющими фазами, зафиксированными в покрытиях, являются частицы боридов и карбидов титана. Отмеченные выше частицы оказывают положительное влияние на повышение твердости и износостойкости титана. Максимальное значение микротвердости зафиксировано у покрытий, полученных при обработке с током пучка электронов равным 22 мА. Полученные данные хорошо коррелируют с данными триботехнических испытаний. Износостойкость покрытий при трении в условиях воздействия нежестко закрепленных абразивных частиц в 8 раз выше износостойкости технически чистого титана.

Ключевые слова: титан, электронно – лучевая наплавка, карбид титана, борид титана, износостойкость.

Введение

Титановые сплавы широко используются в авиа-, ракето-, автомобилестроении, в химической промышленности и медицине. Не смотря на высокую удельную прочность и коррозионную стойкость, титан обладает высоким коэффициентом трения и низкой твердостью, что существенно сужает области его применения [1 – 2].

Для повышения триботехнических свойств титана и сплавов на его основе используются различные способы поверхностного и объемного упрочнения. Наиболее эффективными являются технологии, основанные на воздействии пучка электронов или лазерного луча на поверхность материала [3 – 15]. Данные методы позволяют получать износостойкие слои типа титан – упрочняющие частицы с высоким комплексом свойств. В качестве упрочняющих фаз могут выступать карбиды, бориды и нитриды металлов.

В данной работе для поверхностного упрочнения технически чистого титана применялась технология наплавки порошковых материалов, основанная на использовании промышленного ускорителя электронов типа ЭЛВ – 6. Отличительной особенностью данного ускорителя, разработанного специалистами Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, является вывод пучка электронов в воздушную атмосферу [16]. Использование сварочных флюсов CaF₂ и LiF и высокие скорости обработки позволяют минимизировать окислительное воздействие атмосферы.

Цель данной работы заключалась в исследовании износостойких слоев большой толщины полученных методом вневакуумной электронно – лучевой наплавки смеси порошков карбида бора (20 % вес.), титана (40 % вес.) и флюса (40 % вес.) на пластинах из титанового сплава ВТ1 – 0.

Материалы и методы исследования

Перед электронно-лучевой обработкой компоненты порошковой насыпки равномерно перемешивались между собой и наносились на поверхность титановой заготовки размером 100x50x12 мм. Плотность порошковой насыпки составляла 0,33 г/см². Электронно-лучевая обработка материалов осуществлялась в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск). Скорость перемещения заготовки относительно электронного пучка составляла 10 мм/с, расстояние от выпускного отверстия до заготовки – 90 мм, величина тока пучка электронов – 22, 23 мА. Для обеспечения наплавки на всю ширину заготовки за одно перемещение столика использовалась поперечная развертка пучка электронов, с частотой сканирования 50 Гц и размахом сканирования 50 мм. Энергия электронов была равна 1,4 МэВ.

Структурный анализ полученных материалов проводился на металлографических шлифах с использованием оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m и растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO 50 XVP. Дифракционные картины были получены в Cu K α излучении в пошаговом режиме с использованием дифрактометра ARLX'TRA.

Результаты и обсуждение

Анализ распределения уровня микротвердости по глубине наплавленного слоя проводился на микротвердомере Wolpert Group 402MVD. Нагрузка на индентор составляла 0,98 Н.

Износостойкость оценивалась по потере массы материала в процессе трения в условиях воздействия нежестко закреплённых абразивных частиц в соответствии с ГОСТ 23.208 – 79. Нагрузка на образец составляла 44 Н.

Анализ структуры полученных материалов показал, что они состоят из четырёх характерных зон: зона наплавленного слоя, переходная зона, зона термического влияния (ЗТВ) и исходная структура подложки. Толщина покрытий полученных при наплавке с током пучка 22 мА составляет 3 мм. Повышение тока на 1 мА сопровождается увеличением толщины слоев на 0,2 мм. Следует отметить, что при электронно-лучевой наплавке смеси порошков карбида бора (20 вес. %) и титана формируются слои содержащие трещины и незначительное количество нерастворившиеся частиц исходного порошка, что может негативно влиять на комплекс физико – механических свойств разработанных материалов.

В соответствии с данными рентгенофазового анализа наплавленный слой состоит из α -титана (α' -титана), карбида титана TiC (A1) и моноборида титана TiB (B 27). Полученные результаты коррелируют с данными микроструктурного анализа (рис. 1). Следует отметить, что для кристаллов бориды титана характерным является ускоренный рост в осевом направлении. Первичные кристаллы бориды титана выделяются и растут в виде пустотелых гексагональных призм (рис. 1). Длина кристаллов составляет 120 – 400 мкм, а диаметр 5 – 30 мкм. При приближении к зоне термического влияния морфология первичных кристаллов бориды титана отличается от правильной (рис. 1 б). Это обусловлено нехваткой атомов бора для построения идеальных кристаллов. Вблизи зоны термического влияния наблюдаются частицы бориды титана выделяющиеся в виде тонких полых игл длиной до 20 мкм. Кристаллы карбида титана имеют сферическую и дендритную морфологию (рис. 1).

Микротвердость материала уменьшается в направлении от поверхности к основному металлу, что обусловлено изменением объемной доли упрочняющих фаз и характера их распределения.

Средний уровень микротвердости слоев, полученных при наплавке смеси порошков карбида бора и титана при токах пучка 22 и 23 мА, составляет 582 и 543 HV, соответственно. Полученные данные коррелируют с результатами триботехнических испытаний. Максимальной износостойкостью в 8 раз превышающей износостойкость титана ВТ1 – 0 обладает образец, полученный при наплавке с током пучка 22 мА.

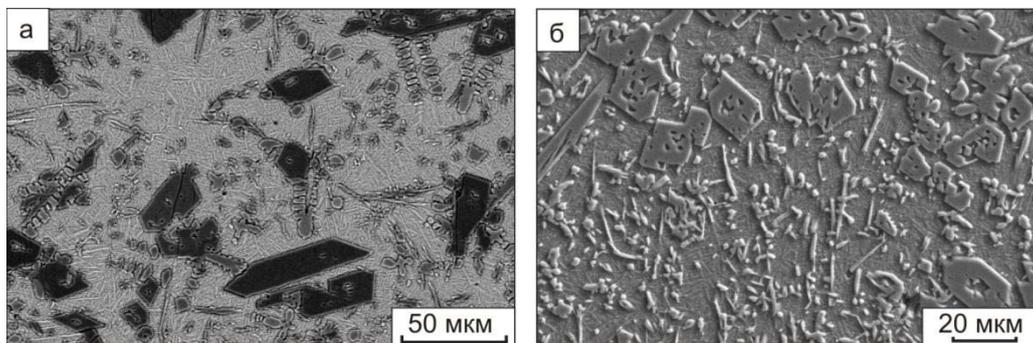


Рис. 1. Микроструктура наплавленных слоев, полученных вневакуумной электронно – лучевой наплавкой смеси карбида бора и титана

Выводы

Учитывая отмеченное, можно сделать вывод о том, что использование технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей позволяет получать высокопрочные покрытия толщиной свыше 3 мм, характеризующиеся малым количеством дефектов. Структура покрытий, содержащая частицы карбида и борида титана обеспечивает высокий уровень твердости и износостойкости материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16 – 33 – 60066 мол_а_дк.

Список литературы

1. Leyens C., Peters M. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications. – Wiley–VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005. – p. 532.
2. Dong H. 3 – Tribological properties of titanium–based alloys. in Surface Engineering of Light Alloys. – Woodhead Publishing, 2010. – p. 58 – 80.
3. Ленивецва О. Г., Самойленко В. В., Голковский М. Г., Батаев И. А., Достовалов Р. А. Получение износостойких покрытий на титановых сплавах методом вневакуумной электронно-лучевой обработки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 3. – С. 103 – 109.
4. Oh J.C., Euh K., Lee S., Koo Y., Kim N.J. Hardness improvement of TiB₂/Ti surface–alloyed material fabricated by high–energy electron beam irradiation // Scripta Materialia. – 1998. – Vol. 39. – P. 1389 – 1394.
5. Lenivtseva O.G., Bataev I.A., Golkovski M.G., Bataev A.A., Samoilenko V.V., Plotnikova N.V. Structure and properties of titanium surface layers after electron beam alloying with powder mixtures containing carbon // Applied Surface Science. – 2015. – Vol. 355. – P. 320 – 326.

6. Lee C.S., Oh J.C., Lee S. Improvement of hardness and wear resistance of (TiC, TiB)/Ti-6Al-4V surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron-beam irradiation // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2003. – Vol. 34. – P. 1461 – 1471.
7. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Teplykh A.Y., Burov V.G., Veselov S.V. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel // *Surface & Coatings Technology*. – 2012. – Vol. 207. – P. 245 – 253.
8. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovski M.G., Krivizhenko D.S., Losinskaya A.A., Lenivtseva O.G. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding // *Applied Surface Science*. – 2013. – Vol. 284. – P. 472 – 481.
9. Yun E., Lee K., Lee S. Improvement of high-temperature hardness of (TiC, TiB)/Ti-6Al-4V surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation // *Surface and Coatings Technology*. – 2004. – Vol. 184. – P. 74 – 83.
10. Ленивецова О. Г., Батаев И. А., Иванцовский В. В., Белоусова Н. С., Головин Е. Д., Зимоглядова Т. А. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка углеродсодержащих порошковых смесей на заготовки из титана BT1-0 // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2013. – № 4. – С. 49 – 57.
11. Li J., Yu Z., Wang H., Li M. Microstructural characterization of titanium matrix composite coatings reinforced by in situ synthesized TiB + TiC fabricated on Ti6Al4V by laser cladding // *Rare Metals*. – 2010. – Vol. 29. – P. 465 – 472.
12. Liang J., Chen S., Liu C., Liu F. Study on microstructure of laser in-situ formation of TiB_x and TiC titanium composite coatings // *Materials Science Forum*. – 2011. – Vol. 686. – P. 646 – 653.
13. Zhang Y., Sun J., Vilar R. Characterization of (TiB + TiC)/TC4 in situ titanium matrix composites prepared by laser direct deposition // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2011. – Vol. 211. – P. 597 – 601.
14. Sun R.L., Lei Y.W. Microstructure and wear resistance of laser clad layer of TiN on TC4 alloy // *Journal of Tianjin Polytechnic University*. – 2007. – Vol. 26. – P. 57 – 59.
15. Tian Y.S., Chen C.Z., Wang D.Y., Lei T.Q. Laser Surface Modification of Titanium Alloys — a Review // *Surface Review and Letters*. – 2005. – Vol. 12. – P. 123 – 130.
16. Грищенко А.И., Корабельников Б.М., Кузнецов С.А., Куксанов Н.К., Салимов Р.А. Сдвоенные ускорители типа ЭЛВ // *Приборы и техника эксперимента*. – 1980. – №3. – С. 21 – 22.

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF Ti – TiC – TiB LAYERS FABRICATED BY
NON – VACUUM ELECTRON – BEAM CLADDING**

Lenitseva O.G., Ph.D. (Engineering), Senior Researcher: e – mail: lenitseva_olga@mail.ru
Chuchkova L.V., Master's Degree student e – mail: l_chuchkova@bk.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

In this study, investigations of cladded layers fabricated by non-vacuum electron – beam cladding of titanium and boron carbide powder mixtures on cp-titanium plates were carried out. The microstructure of the samples was examined using the methods of the optical and scanning electron microscopy. It was found that the structure of the cladded layers consisted of the four zones: the cladded layer, the intermediate layer, the heat affected zone (HAZ) and the initial substrate structure. The thickness of the cladded layer depended on the processing parameters and reached 3.0...3.2 mm. The particles of titanium carbides and titanium borides were the main hardening phases formed in the coatings. The formation of these particles led to increasing hardness and wear resistance of titanium. The maximum value of the microhardness was detected in the coatings obtained by electron beam cladding with an electron beam current of 22 mA. The obtained results corresponded to the results of tribotechnical tests. The wear resistance of the coatings was 8 times higher than the wear resistance of cp – titanium.

Keywords: titanium, electron beam cladding, titanium carbide, titanium boride, wear resistance.

Funding: The reported study was funded by RFBR, according to the research project No. 16-33-60066 mol_a_dk.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРОЧНЯЮЩЕГО ОБКАТЫВАНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

*БЛЮМЕНШТЕЙН В. Ю., доктор техн. наук, профессор,
МИТРОФАНОВА К. С., магистрант
(КузГТУ имени Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия)*

Блюменштейн В.Ю. – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28,
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
е – mail: blumenstein@rambler.ru

Аннотация

Выполнено конечно-элементное моделирование (МКЭ) процесса обкатывания сложнопрофильным инструментом. В результате решения задачи получены распределения компонент тензоров напряжений и деформаций, интенсивности деформаций и гидростатическое давления с учетом специфической геометрии деформирующего инструмента.

Ключевые слова: упрочнение, поверхностное пластическое деформирование, конечно – элементное моделирование, сложнопрофильный инструмент, распределение деформаций.

Введение

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) находит применение в таких областях промышленности, как горное машиностроение, авто- и приборостроение, авиастроение и др. Упрочняющее обкатывание роликами относится к высокопроизводительным методам финишной обработки ответственных изделий деталей машин. Преимущества упрочняющего обкатывания заключаются в значительном упрочнении поверхностного слоя металла, повышении микротвердости, создании благоприятных сжимающих напряжений и образовании благоприятного микрорельефа [1 – 2].

Анализ показал, что в этой области активно развивается направление, связанное с моделированием процессов ППД инструментами традиционного профиля [1 – 6].

Одним из наиболее развитых и информативных методов численного моделирования является метод конечных элементов (МКЭ), основанный на интегрировании систем дифференциальных уравнений механики деформирования с учетом принятой модели твердого тела.

М. С. Махалов и В. Ю. Блюменштейн выполнили МКЭ – моделирование процессов резания и ППД, что позволило определить упрочнение и тензор остаточных напряжений исходя из теоремы о разгрузке [3].

В работах С.А. Зайдеса рассматривается модель процесса охватывающего ППД; выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния и остаточных напряжений [4 – 5].

А.С. Букатый выполнил моделирование процесса упрочнения галтелей коленчатого вала обкатным роликом (рис.1) [6]. Результаты моделирования процесса упрочнения в динамике позволили учесть эффект упрочнения в прочностных расчетах.

В. П. Кузнецов с соавторами в статье, посвященной МКЭ наноструктурного выглаживания, выявили условия, способствующие образованию наноструктуры в поверхностном слое обрабатываемого металла [7].

W.W.Wang, B.B. Jia и J.B. Yipри проведении конечно элементного моделирования процесса ударной обработки листового материала установили, что в поверхностном слое листа происходит растяжение по двум направлениям [8].

Ф. Mohammadi, R.Sedaghati и А. Bonakda провели моделирование процесса упрочнения поверхности традиционным шариковым индентором, что позволило установить значения сжимающих напряжений в поверхностном слое металла [9].

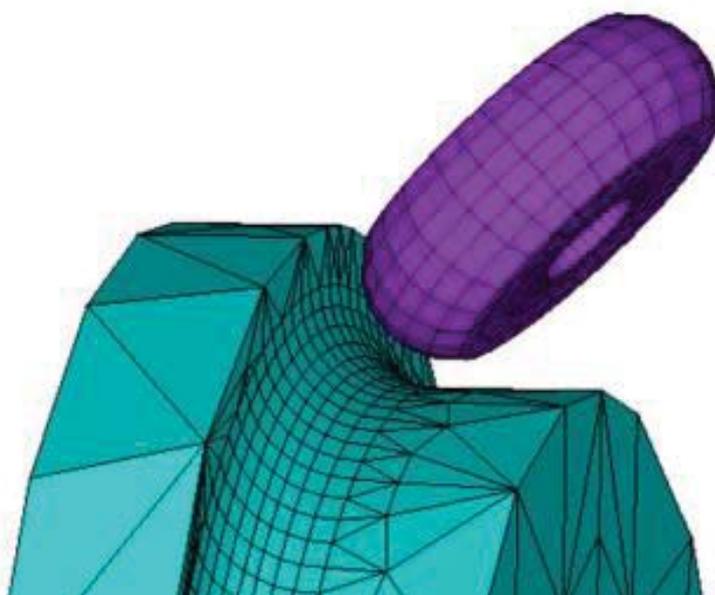


Рис. 1. Модель процесса упрочнения галтелей коленчатого вала обкатным роликом

R.Hill при проведении конечно элементного моделирования установил связь между критерием устойчивости упругого твердого тела в состоянии конечной деформации и критериями для решения краевой задачи.

В. М. Смелянским разработана механическая теория процесса ППД, проведено моделирование напряженно – деформированного состояния очага деформации и закономерности формирования поверхностного слоя деталей машин. Так, при обработке ППД возникает очаг деформации (ОД), форма и размеры которого зависят от технологических факторов (рис. 2) [1]. Движение частицы металла осуществляется по линии тока, взятой на определенной глубине и определяемой из решения задач механики.

Перемещаясь вдоль линии тока, эквидистантной профилю очага деформации, частица проходит через три состояния: начальное, текущее и конечное. Анализ модели позволил получить распределение компонент тензора напряжений и деформаций и оценить влияние гидростатического давления на исчерпание запаса пластичности металла.

В. Ю. Блюменштейном с помощью МКЭ указанная модель развита в направлении учета технологического наследования и показано влияние гидростатического давления на формирование поверхностный слой обрабатываемого металла [2].

Полученные закономерности положены в основу механики технологического наследования, что позволило разработать конструкции специальных сложнопрофильных деформирующих инструментов [10 – 12].

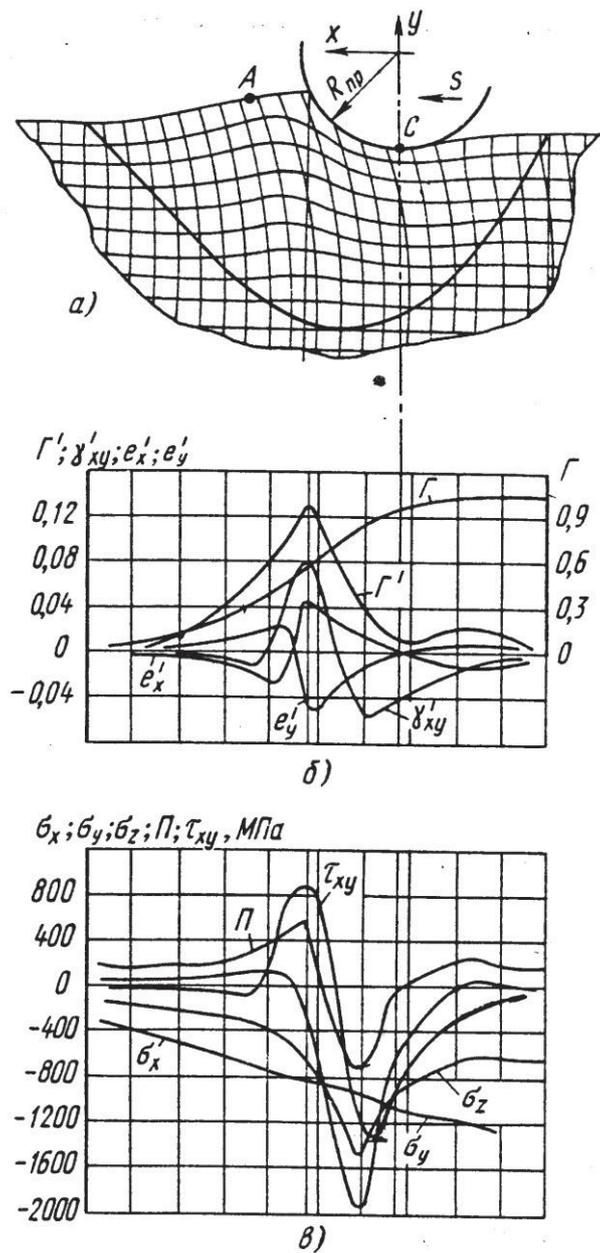


Рис. 2. Сечение очага деформации в плоскости подачи инструмента при обкатывании (а) и распределение параметров деформированного (б) и напряженного (в) состояний вдоль первого ряда координатных ячеек, примыкающих к поверхности детали

Одним из специальных деформирующих инструментов, разработанным на каф. ТМС КузГТУ является мультирадиусный ролик, (рис. 3).

Особенностью мультирадиусного (сложнопрофильного) ролика (патент № 2530600) является наличие 4-х профилей с разными радиусами, что дает новые возможности по управлению технологическим процессом обработки и повышению пластичности без разрушения поверхностного слоя.

При проектировании деформирующего инструмента, важно чтобы каждый деформирующий элемент выполнял свое назначение.

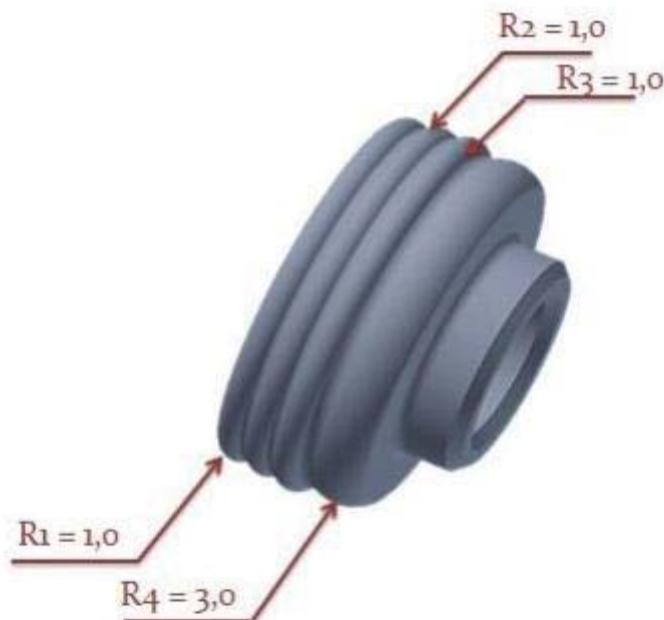


Рис. 3. 3 – D схема мультирадиусного ролика

В. Ю. Блюменштейном и М.С. Махаловым проводилось моделирование напряженно-деформированного состояния металла поверхностного слоя с использованием 3 – х основных типов роликов специального профиля. Удалось получить распределения компонент тензора напряженного состояния, относительных деформаций вдоль линий тока в очаге деформации. По полученным значениям параметров напряженно-деформированного состояния был выполнен расчет характеристик механического состояния поверхностного слоя вдоль линий тока в очаге деформаций. Были выявлены распределения компонент напряжений и деформаций, возникающих при обработке. Это позволило сформировать представления о закономерностях процессов, протекающих в очаге деформации, оценить максимальные напряжения и деформации, выделить области их локализации.

В то же время ряд вопросов требуют проведения новых исследований. В частности, требует уточнения постановка задачи МКЭ – моделирования, включая кинематику процесса ППД.

Материалы и методы

Несмотря на проведенные теоретические и экспериментальные исследования, прогнозирование деформаций в поверхностном слое обрабатываемых деталей при обкатывании сложнопрофильным инструментом, является достаточно сложной задачей. Кроме того представляет интерес эффективность и особенность формирования поверхностного упрочненного слоя при применении сложнопрофильного инструмента.

В рамках постановки двумерной задачи и условий плоскодеформированного состояния было проведено моделирование процесса обкатывания образца из стали 45. По параметрам очага деформации сформировали начальные и граничные условия для решения контактной задачи в среде *Ansys*.

Моделирование и анализ задачи в *Ansys* проходили в несколько этапов.

Первый: построение модели с заданными свойствами (рис.4). Данный этап включал в себя постановку задачи для моделирования исходя из механики деформирования поверхностного слоя, построение геометрии заготовки, построение геометрии инструмента.

На поверхность жестко закрепленной по нижним и боковым границам цилиндрической детали (80×60мм), со свойствами, приведенными в таблице 1, воздействует мультирадиусный ролик с профильными радиусами: $R_1=1\text{мм}$ с натягом $h_{д1} = 0,05\text{ мм}$; $R_2 = 1\text{мм}$ с натягом $h_{д2} = 0,10\text{ мм}$; $R_3 = 1\text{мм}$ с натягом $h_{д3} = 0,15\text{ мм}$; $R_4 = 3\text{мм}$ с натягом $h_{д4} = 0,05\text{мм}$ (рис. 5).

При моделировании заготовки и индентора в *Ansys* был использован один размер сетки размерами $1\times 1\text{мм}$, что позволило получить более точные результаты.

Таблица 1

Физические и механические свойства металла и параметры кривой течения (сталь 45, ГОСТ 1050 – 88, 160 – 180 HV)

| | | |
|-------------------------------------|----------------------------|--------------------|
| Модуль Юнга | $E, \text{ МПа}$ | 2×10^{11} |
| Плотность | $\rho, \text{ кг/м}^3$ | 7800 |
| Коэффициент Пуассона | ν | 0,3 |
| Коэффициент трения | η | 0,21 |
| Экстраполированный предел текучести | $\sigma_{ms}, \text{ МПа}$ | $3,66\times 10^8$ |
| Тангенциальный модуль | $T_{mod}, \text{ МПа}$ | $2,596\times 10^6$ |



Рис. 4. Постановка задачи моделирования процесса обкатывания

Второй: решение задачи состояло из 399 шагов. Вначале индентор находится от поверхности с зазором 0,3 мм с целью «не задеть» пластическую волну. Поверхность заготовки при этом не имеет пластической зоны – очага деформации. Все перемещения осуществляются от исходного положения в системе координат XYZ. Каждый шаг выполнялся в несколько ходов:

- 1) 1 ход – смещение индентора вниз по оси Y на 0,32 мм (создается внедрение с натягом 0,02 мм);
- 2) 2 ход – смещение индентора влево по X на 0,1 мм (осуществляется отвод индентора и смещение на величину подачи 0,1 мм);
- 3) 3 ход – смещение индентора вниз по оси Y на 0,32 мм (создается внедрение, т.е. натяг 0,02 мм);
- 4) 4 ход – смещение индентора влево по X на 0,2 мм (осуществляется отвод индентора и смещение на величину подачи -0,1 мм) (рис. 5).

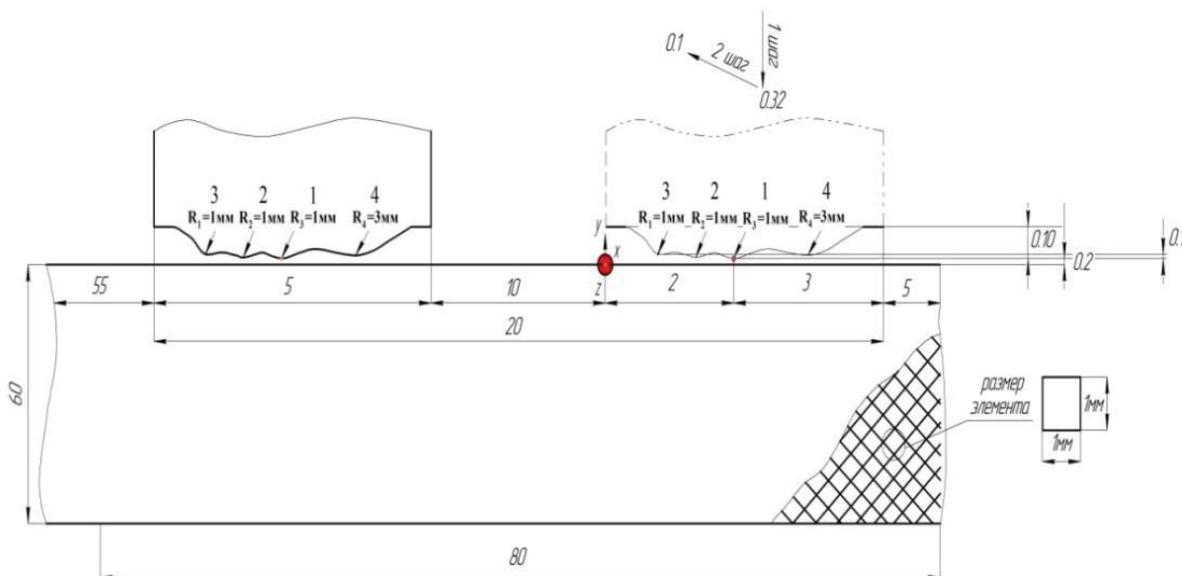


Рис. 5. Схема обработки МР – роликом в Ansys

Третий: постпроцессорная обработка заключалась в экспорте результатов в числовом и графическом виде.

Были получены распределения полных, упругих, пластических деформаций, главных напряжений, интенсивности напряжений.

Результаты и обсуждение

На рис. 6 представлено распределение накопленных полных деформаций в обрабатываемом образце при движении индентора, шаг № 398 – снятие нагрузки. Из рисунка видно, что локализация деформаций с наибольшими перепадами происходит под малыми радиусами с большими натягами $R_2 = 1$ мм и $R_3 = 1$ мм. Так, под радиусом с наибольшим натягом $R_3 = 1$ мм наблюдаются максимальные перепады значений полных деформаций ($-381E^{-08}$... $-655E^{-08}$), на глубине 450 – 530 мкм (рис. 6, а). Именно под этими радиусами будет наибольшее число структурных дефектов при вдавливании индентора.

Следует отметить, что под наибольшим радиусом $R_4 = 3$ мм, ($h_{д4} = 0,05$ мм), деформации имеют невысокие значения. Вследствие упрочнения при значительных пластических деформациях линии локализации имеют «размытые» границы. При нагружении максимальные полные деформации распространяются на глубину 350 – 500 мкм (рис. 6, б).

В целом деформации отмечаются на глубине до 2500 мкм.

Также, установлено, что наибольшая концентрация деформаций и напряжений образуется в зоне пластического течения металла в очаге деформации (рис.7). Видно, что ОД вытягивается в длину в направлении подачи, при этом максимальные деформации концентрируются на небольшой глубине 1 – 2 мм. Это подтверждается высокими значениями микротвердости на данном участке (350 – 280 HV) (рис. 9).

В наибольшей степени в процесс обработки вовлечены 2-й ($R_2 = 1\text{ мм}$) и 3-й инденторы ($R_3 = 1\text{ мм}$).

Максимальный перепад значений компонент деформации можно наблюдать впереди малых деформирующих элементов пластической деформации.

На рис. 8 представлена эпюра распределения гидростатического давления после 399 шага. Видно, что наибольшая равномерность наблюдается на небольшой глубине (до 500 мкм), что соотносится с тонким поверхностным слоем. Максимальные значения давления сосредоточены под радиусом с наибольшим натягом ($R_3 = 1\text{ мм}$).

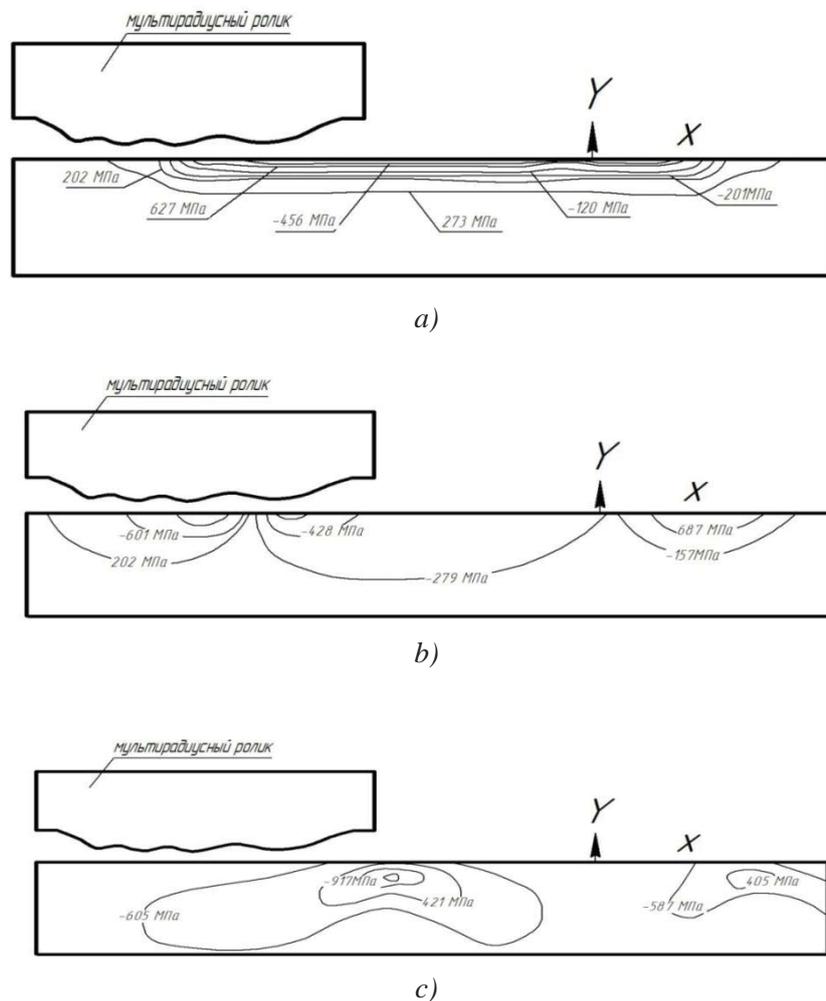


Рис. 6. Распределение компонент полных деформаций, шаг 398

a) ϵ_y ; b) ϵ_x ; c) ϵ_{xy}

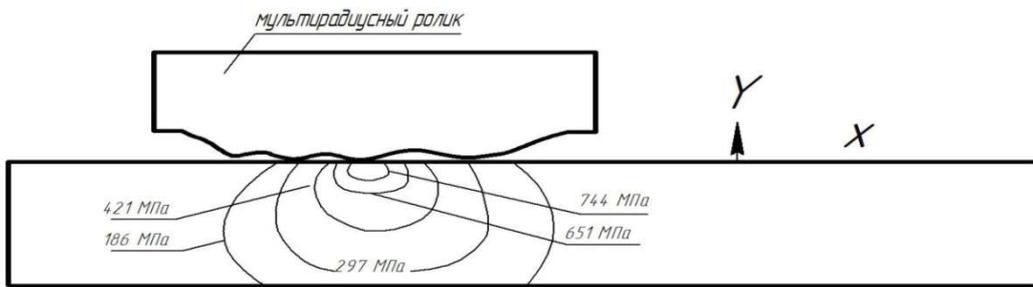


Рис. 7. Интенсивность напряжений, шаг 399

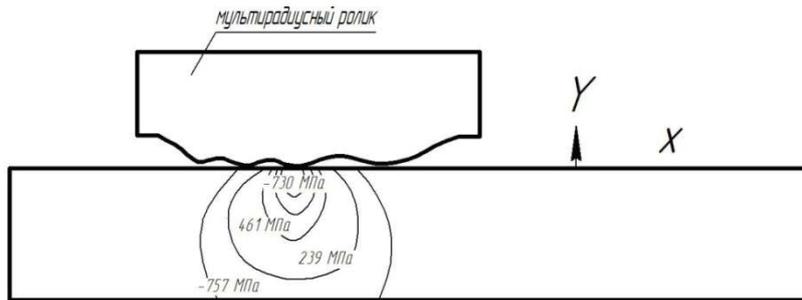


Рис. 8. Гидростатическое давление, шаг 399

На основе анализа рис. 8 можно сказать, что данная точка располагается в области перехода «поверхность обрабатываемой детали – радиус с наибольшим натягом».

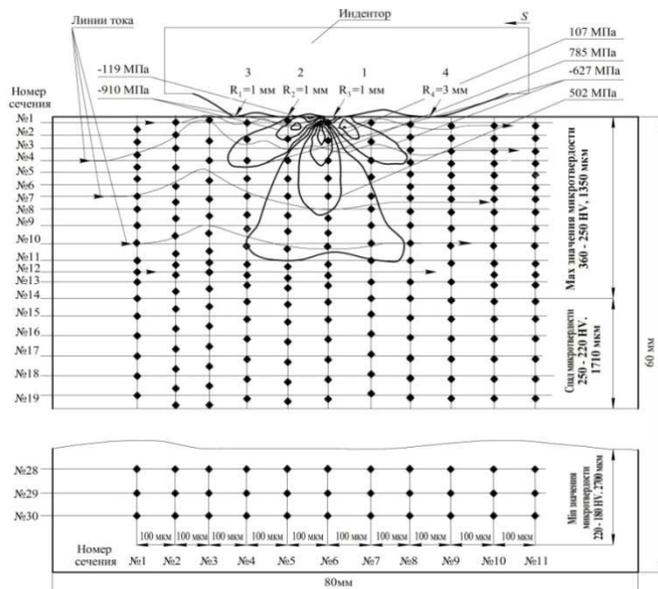


Рис. 9. Схема распределения микротвердости и полных деформаций ϵ_x (шаг 399)

Выводы

Анализ результатов моделирования процесса упрочняющей обработки сложнопрофильным инструментом показал, что:

- 1) при нагружении детали под движущимся индентором возникают и накапливаются значительные деформации;
- 2) в поверхностном слое (5 – 50 мкм) значения деформаций достигают 100 % постепенно снижаясь вглубь поверхностного слоя;
- 3) наибольшая локализация деформаций установлена под малыми радиусами с наибольшими натягами;
- 4) анализ распределения микротвердости и деформаций показал, что наибольшая локализация деформации происходит на небольшой глубине (до $h = 1350$ мкм) в сечениях, где радиус инструмента наименьший.
- 5) максимальные значения микротвердости преобладают в вертикальных сечениях № 5, 6, 7, что соответствует расположению малых деформирующих инденторов (2-й ($R_2 = 1$ мм) и 3-й инденторы ($R_3 = 1$ мм)), наиболее вовлеченных в процесс обработки (рис. 9);
- 6) получена высокая сходимости результатов, полученных с помощью МКЭ и экспериментально по распределению микротвердости.

Результаты исследований могут быть использованы для прогнозирования качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей после упрочняющего обкатывания сложнопрофильными инструментами на стадии технологического проектирования.

Список литературы

1. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
2. Блюменштейн В. Ю., Смелянский В. М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение – 1, 2007. 400 с.
3. Махалов М. С., Блюменштейн В.Ю. Моделирование остаточных напряжений на стадиях жизненного цикла изделий // Вестник машиностроения, 2014. №12. С. 21 – 25.
4. Зайдес С.А., Колесник А.В. Механика формирования остаточных напряжений при поверхностном пластическом деформировании на основе динамического // Вестник ИрГТУ, 2017. №1 (120). Том 21. С. 24 – 31.
5. Зайдес С.А., НгоКаоКьонг. Современный подход к определению напряженного состояния в очаге деформации при локальном нагружении // Известия высших учебных заведений, 2016, №7 (676). С. 56 – 63.
6. Букатый А.С. Повышение точности изготовления ответственных деталей двигателей средствами статического и динамического моделирования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2014, том 16. №6 (2).
7. Кузнецов В.П., Смолин И.Ю., Дмитриев А.И. и др. Конечно – элементное моделирование наноструктурирующего выглаживания. Томск, журнал «Физическая мезомеханика», 2011. Т.16. №6. С. 87 – 97.
8. Wang W.W. , Jia B.B., Yu J.B. A new flexible sheet metal forming method and its stamping process. The 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan, October 25 – 30, 2015.
9. Mohammadi F., Sedaghati R., Bonakdar A. Finite element analysis and design optimization of low plasticity burnishing process. Springer. Proc. Inst. Mech. Engrs, Part: B J. Engng Manuf. – 2014/ - V. 225. P. 47 – 54.

10. Ролик обкатной комбинированный: пат. 2529335 Рос. Федерация. № 2013135796/02 ;заявл. 30.07.2013; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27 (II ч.). 6 с.
11. Ролик обкатной двухрадиусный : пат. 2530600 Рос. Федерация. № 2013135794/02 ; заявл. 30.07.2013; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28 (II ч.). 7 с.
12. Ролик обкатной мультирадиусный: пат. 2557377 Рос. Федерация. № 2013135797/02 ;заявл. 20.07.20153; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 27 (II ч.). 6 с.

**MODELING OF THE STRENGTHENING SURGERY PROCESS WITH A
SPECIAL DEFORMING TOOL**

Blyumenshtein V.Ju., doctor of Science, professor, e – mail: blumenstein@rambler.ru

Mitrofanova K.S., undergraduate, e – mail: kirmeetzz@mail.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennya str., Kemerovo,

Abstract

Finite element modeling of the rolling process by a special deforming tool was performed. As a result of the solution of the problem, distributions of stress tensor and deformation tensor components, strain intensity and hydrostatic pressure are obtained taking into account the specific geometry of the deforming tool. The analysis in the field of finite element modeling of the process of strengthening processing is carried out in the article. It is shown that, due to hardening by tools of a special profile, microhardness increases, and significant deformations accumulate in the surface layer of the workpiece.

A high convergence of the results obtained with the help of FEM and experimentally on the distribution of microhardness was obtained.

The results of the research can be used to predict the quality of the surface layer and the operational properties of parts after hardening rolling by complex tools at the stage of technological design.

Keywords: strengthening, plastic deformation of the surface, finite element method, special deforming tool, strain distribution.

**ФОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ОТДЕЛОЧНО – УПРОЧНЯЮЩЕЙ ВИБРАЦИОННОЙ
ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ**

*ТАМАРКИН М. А., доктор техн. наук, профессор,
ТИЩЕНКО Э. Э., канд. техн наук, доцент,
ГРЕБЕНКИН Р. В., аспирант
(Донской государственный технический университет, г. Ростов – на – Дону, Россия)*

Тамаркин М.А. – 344000, г. Ростов – на – Дону, пл. Гагарина, 1,
Донской государственный технический университет,
е – mail: tehn_rostov@mail.ru

Аннотация

В статье представлены результаты исследований процесса вибрационной обработки деталей в среде стальных шариков. Получен комплекс моделей формирования показателей надежности технологического процесса, позволяющих обеспечить повышение эффективности и достижение заданной величины и стабильности параметров качества обрабатываемой детали. Установлены зависимости для определения среднего арифметического отклонения профиля шероховатости поверхности, глубины упрочнения, степени деформации, времени обработки. Разработаны методические рекомендации по обеспечению надежности технологического процесса.

Ключевые слова: вибрационная отделочно-упрочняющая обработка деталей, надежность технологического процесса, шероховатость поверхности, глубина упрочнения, степень деформации.

Введение

Под надежностью технологических систем и осуществляемых ими технологических процессов (ТП) понимают его свойство обеспечивать требуемые точность и качество детали, получаемые обработкой заготовки на одном или на нескольких этапах. При этом необходимо сохранение в процессе обработки промежуточных технологических параметров точности и качества в установленных пределах. Исследования надежности технологических систем и осуществляемых ими технологических процессов регламентируются ГОСТ 27.202 – 83 [1], согласно которому при контроле ТП по рассеянию размеров после обработки поверхности детали определяют значения показателей точности.

Надежность технологического процесса необходимо оценивать только по уровням тех показателей и параметров качества продукции, которые непосредственно зависят от технологии изготовления. В процессе анализа надежности следует исходить из заданных показателей качества готового изделия и номинальных значений, которые заранее установлены конструктором в конструкторской документации. Перед технологом, проектирующим технологию изготовления детали, стоит задача: без рассмотрения технического уровня самих изделий оценить, насколько процесс изготовления обеспечивает соблюдение установленных требований. Несмотря на то, что продукция при реализации такого технологического процесса, может быстро устаревать морально или же иметь низкое качество, сам технологический процесс может обладать высокой надежностью.

Описание экспериментальных исследований

В качестве объекта для исследования надежности выбран технологический процесс вибрационной отделочно-упрочняющей обработки (ВиОУО) в среде стальных шариков. ВиОУО является одним из наиболее перспективных методов обработки деталей машин и приборов. Он обладает высокой производительностью, имеет большие технологические возможности, достаточно легко подвергается механизации и автоматизации. ВиОУО применяется на операциях упрочнения и отделки деталей, скругления острых кромок, подготовки деталей под покрытия (гальванические, лакокрасочные, резиновые, клеевые и др.).

Целью настоящих исследований является повышение эффективности и надежности технологических процессов ВиОУО с учетом исследования формирования показателей точности на основании разработки комплекса адекватных теоретических моделей процесса обработки.

Для анализа надежности технологических процессов, согласно [1, 2], используются коэффициенты надежности технологических процессов механической обработки деталей. При контроле технологических процессов по количественному признаку определены следующие значения показателей точности:

1. Коэффициент точности (по контролируемому параметру)

$$K_T = \frac{\omega^P}{T},$$

где ω^P – поле рассеяния, или разность максимального и минимального значений контролируемого параметра за установленное (контрольное) время; T – допуск на контролируемый параметр.

При нормальном законе распределения контролируемого параметра

$$\omega^P = 6\sigma,$$

где σ – среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра.

Процесс или его элемент стабильно обеспечивают точность контролируемого параметра, если

$$K_T \leq K_{T0} \leq 1,$$

где K_{T0} – нормативное (предельное, технически обоснованное) значение K_T .

2. Коэффициент мгновенного рассеивания (по контролируемому параметру)

$$K_p(\tau) = \frac{\omega^P(\tau)}{T},$$

где $\omega^P(\tau)$ – поле рассеяния контролируемого параметра в момент времени τ .

3. Коэффициент смещения (контролируемого параметра)

$$K_{cm}(\tau) = \frac{\bar{\Delta}(\tau)}{T},$$

где $\bar{\Delta}(\tau)$ – среднее значение отклонения контролируемого параметра относительно середины поля допуска в момент времени τ ,

$$\bar{\Delta}(\tau) = \left| \bar{y}(\tau) - y_0 \right|$$

где $\bar{y}(\tau)$ - среднее значение контролируемого параметра; y_0 - значение параметра, соответствующее середине поля допуска (при симметричном поле допуска значение y_0 , совпадает с номинальным значением параметра $y_{ном}$).

4. Коэффициент запаса точности (по контролируемому параметру)

$$K_z(\tau) = 0,5 - K_{cm}(\tau) - 0,5K_p(\tau).$$

При контроле точности должно выполняться условие $K_z(\tau) > 0$.

Результаты и обсуждения

Для расчета параметров надежности проектируемых технологических процессов отделочно-упрочняющей вибрационной обработки необходимо прогнозировать рассеяние показателей качества изготавливаемых деталей. Для этого нужно получить теоретические зависимости для определения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости, глубины упрочнения и степени деформации.

Авторами были проведены исследования формирования шероховатости обработанной поверхности при ВиОУО. При этом сделаны следующие основные допущения: шар, двигаясь под некоторым углом α к обрабатываемой поверхности, внедряется и проходит при этом некоторое расстояние по этой поверхности. Образуется отпечаток, который представляет собой часть эллипсоида с полуосями a и b большой и малой соответственно. При наложении единичных следов формируется профиль шероховатости поверхности. Для упрощения схемы взаимодействия принято, что диаметры всех шаров одинаковы. При этом учитывается только скольжение шара по поверхности при внедрении. Возможное перекатывание исключается. Анализируется только среднее вероятностное значение различных параметров единичного взаимодействия [3].

Эффективную скорость соударения шара с поверхностью детали можно определить по зависимости:

$$V_{эф} = k_{эф} \cdot A \cdot \omega,$$

где A – амплитуда колебаний рабочей камеры; ω – частота колебаний рабочей камеры; $k_{эф}$ – коэффициент, учитывающий влияние соседних шариков при ВиОУО.

Максимальная глубина внедрения шарика в поверхность детали определяется следующим образом

$$h_{max} = 2 \cdot k_{эф} \cdot A \cdot \omega \cdot R \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ш}}{3 \cdot k_s \cdot c \cdot \sigma_T}},$$

где R – радиус шарика, $\rho_{ш}$ - плотность материала шарика; σ_T - предел текучести материала детали, c – коэффициент несущей способности контактной поверхности, k_s - коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта.

Проекция пятна контакта шарика с поверхностью детали на плоскость представляет собой эллипс с большой и малой полуосями a и b соответственно, величины которых можно определить по зависимостям:

$$b = \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2},$$

$$a = \frac{\pi}{2} \cdot (\operatorname{ctg} \alpha - f) \cdot h_{\max} + b,$$

где f – коэффициент трения скольжения шарика по материалу обрабатываемой детали.

При ВиОУО изменение шероховатости происходит от исходной до некоторой характерной для данного метода при конкретных технологических режимах обработки. Такую шероховатость называют установившейся. Среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости при ВиОУО определим по зависимости:

$$Ra = 0.002 \sqrt{\frac{h_{\max} \cdot l_{ed} \cdot a \cdot b}{R^2}},$$

где l_{ed} – единичная длина, введенная для сохранения размерности.

Определение рационального времени обработки деталей при ВиОУО играет важную роль в процессе формирования качества их поверхностного слоя. Необходимо избегать такого явления как перенаклёп, который приводит к снижению прочности, отслаиванию, шелушению поверхностного слоя металла и появлению трещин в нем. Образование перенаклёпа обработанной поверхности способно негативно влиять на эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей. Перенаклёп является необратимым явлением, при котором невозможно восстановление качества поверхностного слоя металла, даже при использовании термообработки. Для наиболее точного прогнозирования и планирования технологического процесса необходимо знать и уметь определять расчетное время обработки до появления перенаклёпа. На основании проведенных исследований получена зависимости для определения времени достижения заданной шероховатости поверхности при ВиОУО:

$$t_F = \frac{4 \cdot h_{\max} \cdot F \cdot R^2}{V_S \cdot f_g}$$

где F – число повторяющихся ударов в одну и ту же точку обрабатываемой поверхности, V_S – объём деформируемого металла при единичном взаимодействии шарика с обрабатываемой поверхностью, f_g – частота циклов воздействия рабочей среды на поверхность детали

При решении технологических задач ВиОУО важное значение имеет аналитический расчет ожидаемого значения глубины упрочнения h_n и степени деформации \mathcal{E} . От толщины упрочненного слоя зависят многие эксплуатационные свойства деталей, например, усталостная прочность и долговечность. Если при внедрении индентора в поверхность детали в зоне контакта возникает остаточная вмятина (пластический отпечаток), то вокруг нее всегда имеется пластически деформированная область, распространяющаяся на некоторую глубину h_n . Величина h_n определяет зону поверхностного слоя, в которой имеются остаточная деформация зерен и дислокаций

кристаллической решетки, образованные в результате приложения внешней нагрузки. Параметр контакта h_n имеет существенное практическое значение, поскольку прямо или косвенно характеризует механическое состояние (упрочнение, запас пластичности, остаточную напряженность) локальной пластической области при единичном контакте или поверхностного слоя детали, подвергнутой упрочнению.

Такой параметр упрочнения как степень пластической деформации ε также оказывает влияние на механическое состояние поверхностного слоя материала обрабатываемой детали. Аналитическое определение глубины упрочнения и степени деформации в зависимости от физико-механических свойств материала детали и параметров процесса является очень сложной задачей. Известные технологические зависимости получены с учетом многочисленных допущений и с использованием таких величин, определение которых вызывает сложности. В связи с этим при выведении зависимостей для определения h_n и ε ставилась задача использовать параметры, которые легко вычислить при проведении аналитических или определить при экспериментальных исследованиях. Также был учтен тот факт, что с переходом от статического нагружения к ударному возрастает сопротивление материала вдавливанию в него инденторов, т.е. возрастает уровень твердости материала, вследствие чего динамическая твердость HD_d оказывается больше статической HD . Количественной мерой возрастания твердости, которая обусловлена динамичностью нагрузки, служит динамический коэффициент твердости η [4], представляющий собой следующее отношение:

$$\eta = \frac{HD_d}{HD}.$$

С достаточной для практики точностью зависимость динамического коэффициента твердости от скорости внедрения индентора при обработке стали, как для случая контакта сферы с плоскостью, так и для тел произвольной формы и кривизны, получена в работе Сидякина Ю. И. [4]:

$$\eta = 0.5 \left(1 - \frac{137V_0}{HD} + \sqrt{1 + \frac{2250 \cdot V_0}{HD}} \right)$$

где HD - статическая твердость, V_0 - начальная скорость удара.

Это выражение позволяет вычислять динамическую твердость сталей по их статической твердости и начальной скорости удара.

На практике довольно часто прибегают к перерасчету одних чисел твердости в другие. Данные перерасчеты производятся исключительно на основе эмпирических зависимостей, которые не полностью описывают внутренние связи между различными числами твердости. В работе [4], автор предлагает использовать одну из наиболее часто используемых зависимостей для перевода твердости по Бринеллю в динамическую твердость:

$$HB = 0,2 \cdot HD^{0,89}$$

С учётом вышеприведенной зависимости и коэффициента твердости, а также условия пластичности Генки-Мизеса [4] при описании пластически деформированной области,

распространяющейся на некоторую глубину вокруг остаточной вмятины (пластического отпечатка) получены следующие формулы для расчёта глубины упрочнения:

$$h_H = 3,8 \cdot R \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \cdot \sqrt{k_{\text{эф}} \cdot A \cdot \omega \cdot \sin \alpha} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{\text{ш}}}{k_c \cdot c \cdot \sigma_T}},$$

и степени деформации:

$$\varepsilon = 0,025 \cdot \sqrt{k_{\text{эф}} \cdot A \cdot \omega} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{\text{ш}}}{\eta \cdot \text{HB}^{1,12}}}.$$

Для проверки достоверности предложенных теоретических моделей формирования шероховатости поверхности, глубины упрочнения и степени деформации при ВиОУО проведены комплексные экспериментальные исследования.

Исследовано влияние амплитуды рабочей камеры, размеров среды и твердости материала детали по Бринеллю на формирование шероховатости поверхности, глубины упрочнения и степени деформации при ВиОУО. Проведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. Разница между результатами не превышает 20 %.

Полученный комплекс теоретических моделей процесса ВиОУО, прошедший экспериментальную проверку, может быть использован для аналитического прогнозирования обеспечения надежности технологических процессов. Были произведены расчеты параметров надежности ТП по вышеприведенным зависимостям при возможном разбросе частоты и амплитуды колебаний в пределах 5 – 10 – 15 процентов и возможном разбросе диаметров стальных шаров в пределах 5 – 10 – 15 процентов при обработке деталей из различных материалов. Некоторые результаты представлены на рис. 1.

Выводы

Разработана методика проектирования технологических процессов ВиОУО с учетом обеспечения их надежности и элементы САПР в виде программного модуля. Рассчитываются показатели точности процесса по формулам, полученным выше. Далее пользователем вводятся поля рассеяния исходных величин (технологических режимов и физико-механических свойств материала детали). Определяются поля рассеяния значений контролируемого параметра, среднее значение отклонения контролируемого параметра относительно середины поля допуска. Рассчитывается значение коэффициента запаса точности по зависимости, представленной выше. В случае выполнения условия $K_3 > 0$, рассчитывается время обработки для каждого варианта сочетаний технологических параметров и выбирается вариант, обеспечивающий минимальное время обработки, которое и считается рациональным.

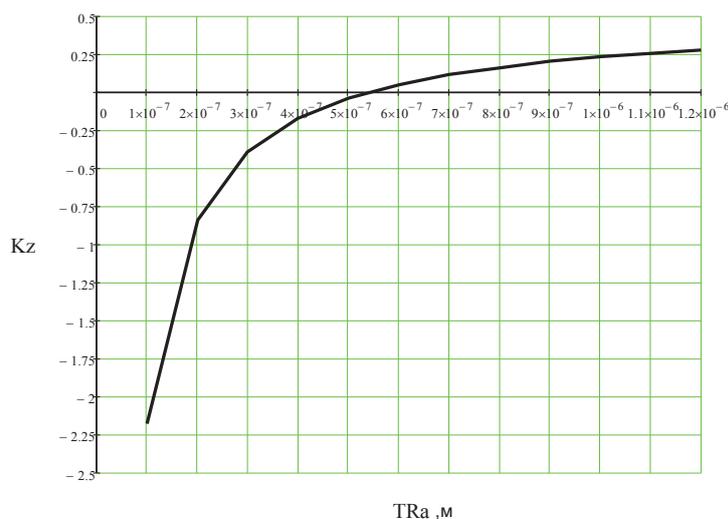


Рис. 1. Влияние величины допуска на надежность технологического процесса.

Контролируемый параметр – шероховатость поверхности Ra. Диапазон изменения допуска 0,1 – 1,2 мкм с шагом 0,1 мкм, диаметр шарика – 10 мм, амплитуда 2,5 мм, частота 26,7 Гц. Материал НВ = 200. Разброс – 5%.

Результаты проведенных исследований и методика проектирования ТП позволят обеспечить надежность процесса ВиОУО.

Список литературы

1. ГОСТ 27.202 – 83 Надежность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности. – 28 с.
2. Дубровский П.В. Обеспечение надежности технологических процессов: Учебное пособие. - Ульяновск, УлГТУ, 200. – 124 с.
3. Tamarkin M., Tichshenko E., Fedorov V. Theoretical bases of the surface layer formation in the finishing and hardening treatment of details by spd in flexible granular environment. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ser. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015" 2016.
4. Сидякин Ю.И. Разработка методов расчета упругопластических контактных деформаций в процессах упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием: автореф. дисс. докт. техн. наук: 01.02.06/Сидякин Юрий Иванович. – М., 2002. – 34 с.

FORMATION OF RELIABILITY INDICATORS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF FINISHING AND HARDENING VIBRATION PROCESSING OF MACHINE PARTS

Tamarkin M.A., Dr. Tech. Sci., professor, e - mail: tehn_rostov@mail.ru

Tischenko E.E., Cand.Tech. Sci., associate professor, lina_tishenko@mail.ru

Grebenkin R.V., graduate student, roman-viktorovich@yandex.ru

Don state technical university, Gagarin square 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia, 344000, Russia

Abstract

The research results of vibration processing of parts in the environment of steel balls are presented in the article. The complex of models of formation of reliability indicators of the technological process allowing to provide increase of efficiency and accuracy achievement of the set value and stability of parameters of quality of a processed detail is received. Dependencies for determining the arithmetic value of deviation of the surface roughness profile, the hardening depth, the degree of deformation, and the processing time are established. Methodical recommendations on maintenance of reliability of technological process are developed.

Key words: finishing and hardening vibration processing of machine parts, reliability of technological process, surface roughness, hardening depth, degree of deformation.

УДК 658.1

РАСЧЕТ СТОИМОСТИ ПРОИЗВОДСТВА БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТРУБЫ МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

*Кучумова И. Д., магистрант 1 года обучения,
Низовкина Н. Г., канд. экон. наук, доцент,
Рубцова О. А., магистрант 1 года обучения
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Кучумова И.Д. – 630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: ivannakz@mail.ru

Аннотация

В данной статье приведен расчет стоимости производства одного метра трубы из фольги ниобия и нержавеющей стали для химической промышленности методом сварки взрывом на основе дифференциального подхода. Полученные данные стоимости были сравнены со стоимостью трубы из чистого ниобия с такими же габаритными размерами.

Ключевые слова: расчет себестоимости, сварка взрывом, биметаллическая труба.

Введение

Биметаллические трубы «ниобий – нержавеющая сталь», полученные методом сварки взрывом, целесообразно применять вместо ниобиевых. Технические аспекты замены ниобиевых труб на биметаллические из ниобия и нержавеющей стали по коррозионностойкости и кислотоустойчивости материалов и сварных соединений в данной статье не рассматриваются. Высокую эксплуатационную надежность обеспечивает слой ниобия, который обладает высокой коррозионной стойкостью в горячих агрессивных средах.

Себестоимость производства единицы продукции является основой для принятия большого числа управленческих решений, например, выпуск, какой продукции, продолжить или прекратить; производить или покупать комплектующие изделия; какую цену установить на выпускаемую продукцию; покупать ли новое оборудование; менять ли технологию и организацию производства.

Методика определения стоимости биметаллической трубы

В соответствии с Международными стандартами финансовой отчетности в себестоимость продукции должны быть включены лишь производственные затраты, но традиционным является получение данных о полной себестоимости продукции. В себестоимость включаются все расходы предприятия независимо от их деления на постоянные, переменные, основные, накладные, прямые, косвенные, производственные и периодические. Затраты, которые невозможно непосредственно отнести на продукцию, в течение месяца накапливаются на соответствующих счетах, а затем переносятся на себестоимость продукции пропорционально выбранной базе. Однако при этом варианте не учитывается, что себестоимость единицы изделия изменяется при изменении объема выпуска продукции. Если предприятие расширяет производство и продажи, то себестоимость единицы продукции снижается, если же предприятие сокращает объем выпуска – себестоимость растет. На практике себестоимость единицы продукции определяется делением общей суммы произведенных затрат, понесенных цехом (подразделением) за определенный промежуток времени, на количество единиц готовой продукции, произведенной за этот промежуток.

Себестоимость может быть рассчитана исходя из фактически понесенных предприятием затрат или на основании установленных норм расхода сырья и материалов, а также нормативных затрат на оплату труда [1]. Расчет плановых затрат целиком ориентирован на будущее. Обобщенная методика калькуляции затрат представлена в таблице 1.

Таблица 1

Схема калькуляции затрат

| | | | |
|--|------------------------------|-------------------------|--|
| Прямые расходы на сырье и материалы +накладные расходы на сырье и материалы | Затраты на сырье и материалы | Идержки поставки товара | Полные издержки (себестоимость) на единицу продукции |
| +прямые расходы на заработную плату производственного персонала +производственные накладные расходы на изготовление | | | |
| +прямые расходы на заработную плату вспомогательного производственного персонала +производственные накладные расходы на них | | | |
| +прямые расходы на заработную плату обслуживающего производственного персонала +производственные накладные расходы на них | | | |
| +административные накладные расходы | | | |
| + накладные расходы по сбыту | | | |
| +возможные прямые расходы, связанные со сбытом | | | |

Простое сравнение затрат без учета их относительной эффективности чревато опасностью сравнивать несопоставимое. Деление затрат на переменные и постоянные выступает как основа процесса оперативного управления ценами и ценообразованием. Он отражает взаимосвязь и взаимозависимость между объемами продажи, себестоимостью и прибылью, позволяет устанавливать точки безубыточности, при которой величина выручки от продажи продукции равняется ее полной себестоимости.

Расчет себестоимости изготовления метровой биметаллической трубы

Расчет себестоимости изготовления трубопровода посредством сварки взрывом фольги ниобия и трубы из нержавеющей стали приведен в табл. 2.

Исходные данные

Внешний диаметр трубы: $D = 100$ мм

Толщина трубы: $T = 10,1$ мм

Длина трубы: $L = 1000$ мм

Для производства биметаллической трубы, полученной сваркой взрывом, применяется фольга ниобия толщиной 0,1 мм и трубная заготовка из нержавеющей стали толщиной 9,9 мм. В качестве трубы для подачи или отвода горячей азотной кислоты можно использовать трубу из ниобия толщиной 10 мм.

Таблица 2

Расчет затрат на производство одного метра биметаллической трубы

| Наименование статьи затрат | Сумма, руб. | Комментарии |
|--|---------------------|--|
| 1. Прямые материальные затраты | | |
| Труба из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т | 225 | Средняя стоимость метра трубы (100×10×1000 мм) из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т составляет 225 руб [3]. |
| Ниобиевая фольга | 14415 | Средняя стоимость ниобиевой фольги (0,1×100×1000 мм) составляет 14415 руб [5]. |
| Взрывчатое вещество марки Аммонит 6ЖВ в виде порошка и электродетонатор [2]. | 2112 | Расчет необходимого количества взрывчатого вещества: Плотность Амонита 6ЖВ: $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$ Необходимый объем взрывчатого вещества: $V = 100 \times 1000 \times 20 = 2 \times 10^6 \text{ мм}^3$ (20 мм – толщина взрывчатого вещества) $m = V \times \rho = 1200 \times 2 \times 10^6 = 2,4 \text{ кг}$ Средняя стоимость 40 кг выбранного взрывчатого вещества составляет 35200 руб. [2]. |
| Электродетонатор | 718,25 | |
| 2. Прямые затраты на изготовление [4]. | | |
| Основная заработная плата | 735 | Средняя часовая ставка ² умножается на трудоемкость изготовления одного метра биметаллической трубы 147руб./час * 5 час=735 руб. |
| Дополнительная заработная плата | 73,5 | 10% от основной на оплату отпусков |
| Отчисления на социальные нужды | 242,55 | 30% от заработной платы |
| 3. Накладные переменные затраты | | |
| На подготовку производства | 220,5 | 30% от основной заработной платы |
| На ремонт оборудования | 2611,85 | 40% стоимости оборудования за весь срок службы |
| Общехозяйственные расходы | 220,5 | 30% основной заработной платы |
| ИТОГО производственная себестоимость | 21574,15 руб | |
| 4. Накладные постоянные затраты | 21574,15 | 100% переменных затрат |
| 5. Нормативная прибыль | 4314,83 | 10% от суммы переменных и постоянных затрат (43148,3 руб) |

Из приведенных данных следует, что нижний предел цены биметаллической трубы составляет **47463 руб.** Средняя стоимость трубы (100×10,1×1000 мм) из ниобия: **89985 руб** [5]. Опираясь на данные расчеты можно сделать вывод, что применение биметаллической трубы «нержавеющая сталь-ниобий» выгоднее, чем трубы из чистого ниобия.

² Средняя заработная плата в Новосибирске составляет 26000 рублей [4]. Среднее число рабочих часов в месяц равно 167,25.

Выводы

Применение предложенного подхода к определению себестоимости способствует повышению эффективности деятельности предприятий, усилению контроля, повышению достоверности показателей и выявлению резервов снижения себестоимости. Основными преимуществами таких расчетов является упрощение и точность исчисления себестоимости продукции (в части только производственных затрат); отсутствие процедур по распределению постоянных затрат между видами продукции (их в состав себестоимости продукции не включают и списывают непосредственно на уменьшение финансового результата); возможность определения порога рентабельности, запаса прочности предприятия и нижней границы цены продукции или заказа; возможность проведения сравнительного анализа рентабельности различных видов продукции, определения оптимальной программы выпуска и реализации продукции; упрощение процессов нормирования, планирования, учета и контроля затрат, так как себестоимость становится более прозрачной; использование в процессе контроля за себестоимостью стандартных (нормативных) затрат и гибких смет, при которых трудоемкость распределения накладных расходов снижается. К недостаткам подхода можно отнести вопрос о справедливости оценки полной себестоимости готовой продукции и незавершенного производства.

Список литературы

1. Низовкина, Н. Г. Управление затратами предприятия (организации): учебное пособие для академического бакалавриата / Н. Г. Низовкина. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 185 с. - (Университеты России). — ISBN 978 – 5 – 534 – 03048 – 8.
2. Вещества взрывчатые промышленные. Аммонит № 6ЖВ и аммонал водоустойчивые. Технические условия [Электронный ресурс]: ГОСТ 21984 – 1976 - <http://vsegost.com/Catalog/81/8181.shtml> (дата обращения 20.11.2015).
3. Стоимость нержавеющей труб марки 12X18H10T [электронный ресурс] - <http://www.truboprom.com/truby/stalnye> (дата обращения 20.11.2015).
4. Средние зарплаты по России [электронный ресурс] - <https://person-agency.ru/salary.html> (дата обращения 20.11.2015).
5. Стоимость изделий из ниобия [электронный ресурс] - <http://www.infogeo.ru/metalls/price/?act=show&okp=176300>

CALCULATION OF COST MANUFACTURING OF BIMETALLIC TUBES BY EXPLOSION WELDING

Kuchumova I.D., Master's Degree Student, e – mail: ivannakz@mail.ru

Nizovkina N.G., Associate professor, e – mail: nizovkina@corp.nstu.ru

Rubtsova O.A., Master's Degree Student, e – mail: oksana.rubtsova@yandex.ru

Novosibirsk State Technical University, prospekt K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

This paper provides production costs calculation of one meter tube by the method of explosion welding of niobium foil and stainless steel plate. This tube can be used in the chemical industry for feeding nitric acid. The calculation was carried out on the basis of a differential approach. The application of the proposed approach in calculating determining the cost contributes to improving the company efficiency, strengthens control, improves the reliability performance and identifies the reserves of cost reduction. The data obtained was compared to the cost of tubes made of pure niobium of the same dimensions.

Keywords: explosion welding, tubes, calculation of cost, differential approach.

УДК 658.1

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЗАТРАТ НА НАУЧНО – ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ РАБОТУ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

*РУБЦОВА О. А., магистрант 1 года обучения,
КУЧУМОВА И. Д., магистрант 1 года обучения
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Рубцова О.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e – mail: oksana.rubtsova@yandex.ru

Аннотация

В данной статье приведен расчет затрат на научно – исследовательскую работу (НИР) по выбору оптимального режима нанесения покрытий.

Ключевые слова: экономический расчет НИР, планирование.

Введение

В данной работе определены затраты на проведение научного исследования нанесения на сталь 20 покрытия из порошка ПН85Ю15, в процессе которого было изготовлено 5 образцов на каждый из четырех режимов напыления. Задачами данного исследования являются выбор методики определения текущих затрат на проведение НИР и оценка этих затрат по исследованию плазменных покрытий. Обзор экономической литературы выявил большое разнообразие методик определения текущих затрат. Главным принципом, на основе которого выбиралась методика оценки затрат, был принцип полноты оценки и надежды на ее достоверность.

Описание методики оценки текущих затрат по исследованию плазменных покрытий

Внутренние затраты на исследования и разработки включают текущие и капитальные затраты. Текущие затраты – это затраты на оплату труда, социальные отчисления, затраты на приобретение оборудования за счет себестоимости работ, другие материальные затраты (стоимость приобретаемых со стороны сырья, материалов, комплектующих изделий, полуфабрикатов, топлива, энергии, работ и услуг производственного характера и др.), прочие текущие затраты. Капитальные затраты – это затраты на приобретение земельных участков, строительство или покупку зданий, приобретение оборудования, включаемого в состав основных фондов и пр. [1].

При расчете текущих затрат на исследование плазменных покрытий используется закон Парето [1], где выбираются основные затраты и их объем принимается за 76 % общего объема затрат. Для целей данного исследования в качестве основных затрат принимаются следующие:

1. Амортизация оборудования;
2. Основные и вспомогательные материалы;
3. Заработная плата;
4. Страховые отчисления;
5. Электроэнергия.

Их сумма принимается за 76 % от общей величины затрат на исследование.

Оценка затрат

Затраты на амортизацию оборудования

Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$Z_{об} = \frac{Ц \cdot F_{ф}}{F_{н} \cdot F_{сс}}, \quad (1)$$

где Ц – цена оборудования, руб.;

$F_{н}$ – номинальный фонд времени (рабочее время в году), ч.;

$F_{сс}$ – срок службы оборудования, год;

$F_{ф}$ – фактическое время занятости оборудования в НИР, ч.

$F_{н} = 365 - 104 - 11 = 250$ дней = 2000 ч.

Вычисленная амортизация оборудования представлена в табл. 1.

Таблица 1

Затраты на амортизацию оборудования

| № | Наименование оборудования | Ц, руб. | $F_{сс}$, год | $F_{ф}$, ч. | $Z_{об}$, руб. |
|-------|------------------------------|-----------|----------------|--------------|-----------------|
| 1 | Шлифовальный аппарат Struers | 600 000 | 5 | 15 | 900 |
| 2 | Микроскоп Carl Zeiss | 2 000 000 | 10 | 10 | 1 000 |
| 3 | Микротвердомер Wolpert Group | 300 000 | 10 | 5 | 75 |
| 4 | Печь СНОЛ | 50 000 | 3 | 3 | 25 |
| 5 | Компьютер | 25 000 | 5 | 500 | 1250 |
| ИТОГО | | | | | 3 250 |

Затраты на заработную плату

Для выполнения данной работы требуется 2 исполнителя – руководитель НИР и инженер лаборатории (инж.). Поскольку в качестве инженера выступает студент, то зарплата начислялась только для руководителя.

Исходными нормативами заработной платы данных категорий работающих является оклад, определяющий уровень месячной заработной платы в зависимости от объема и ответственности работ.

Оклад рассчитывают по следующему выражению:

$$L_0 = T_c \cdot T_{pi}, \quad (2)$$

где T_c – тарифная ставка;

T_{pi} – фактически отработанное время.

Основную заработную плату рассчитывают следующим образом:

$$L_{осн} = 1,2 \cdot L_0, \quad (3)$$

где L_0 – оклад;

1,2 - районный коэффициент по Новосибирску.

На основании пункта 1 ст. 58 закона № 212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году вводится пониженная ставка для расчета отчислений во внебюджетные фонды – 27,1 % от фонда оплаты труда.

Таким образом, затраты на страховые отчисления составят:

$$L_{\text{пенс}} = L_{\text{осн}} \cdot 0.271 = 72000 \cdot 0,271 = 19,512 \text{ руб.}$$

Вычисленные затраты на заработную плату представлены в табл. 2.

Таблица 2

Затраты на заработную плату

| Статьи | Затраты, руб. |
|--------------------------|---------------|
| T_c , руб./день | 1 200 |
| T_{pi} , дней | 50 |
| L_o , руб. | 60 000 |
| $L_{осн}$, руб. | 72 000 |
| $L_{\text{пенс}}$, руб. | 19,512 |
| Итого | 91 512 |

Затраты на электроэнергию

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$\mathcal{E} = \mathcal{C} \cdot N \cdot t_{\text{зан}}, \quad (4)$$

где \mathcal{C} — стоимость 1 кВт/ч электроэнергии, руб.;

N — мощность оборудования, кВт;

$t_{\text{зан}}$ — время занятости оборудования, ч.

Вычисленные затраты на электроэнергию представлены в табл. 3.

Таблица 3

Затраты на электроэнергию

| Наименование оборудования | Цена 1 кВт/ч, руб. | N, кВт | $t_{\text{зан.ч.}}$, ч | Затраты, руб |
|------------------------------|--------------------|--------|-------------------------|--------------|
| Шлифовальный аппарат Struers | 2,18 | 1 | 25 | 54,5 |
| Микроскоп Carl Zeiss | | 1 | 30 | 65,4 |
| Микротвердомер Wolpert Group | | 0,3 | 5 | 3 |
| Печь СНОЛ | | 1,8 | 30 | 117 |
| Компьютер | | 0,2 | 500 | 218 |
| Итого | | | | 457,9 |

Затраты на расходные материалы

Для подготовки шлифов производили механическое полирование шлифов с использованием абразивной шкурки разной зернистости. Затраты на абразивную бумагу рассчитываются по формуле:

$$S = S_{\text{уп}} \cdot n, \quad (5)$$

где $S_{\text{уп}}$ — стоимость упаковки абразивных шкурок одной зернистости – 105 руб. (как правило, 10 штук в упаковке);

n – количество упаковок, разной зернистости. Так как в данной работе используются абразивные шкурки P100, P240, P400, P600, P1000 $n = 5$.

$$S = 105 \cdot 5 = 525 \text{ руб.}$$

Составим смету затрат на НИР (табл. 4).

Таблица 4

Смета затрат

| № | Элемент затрат | Сумма, руб. | % |
|---|--|-------------|------|
| 1 | Заработная плата | 91 512 | 95,4 |
| 2 | Амортизация оборудования | 3 250 | 3,5 |
| 3 | Затраты на электроэнергию | 458 | 0,5 |
| 4 | Затраты на расходные материалы | 525 | 0,6 |
| 5 | Прочие затраты | 1000 | |
| 5 | ИТОГО | 96 745 | 100 |
| 6 | Плановая прибыль (рентабельность P=25 %) | 24 186 | |
| 7 | Цена выполнения НИР | 120 931 | |
| 8 | НДС (18 %) | 21 767 | |
| 9 | Всего с НДС | 142 698 | |

Таким образом текущие затраты по исследованию составляют 142 698.

Выводы

Выбранная методика позволяет быть уверенным, что при оценке затрат на НИР мы учли все возможные затраты, в том числе транзакционные издержки, связанные с составлением, утверждением необходимой документации и такие затраты, как, например, налог на землю, который при прочих равных условиях очень трудно относить на бюджет отдельной научно-исследовательской работы.

Список литературы

1. Низовкина Н. Г. Экономика научных исследований: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 275 с.

ECONOMIC CALCULATION OF EXPENDITURES ON SCIENTIFIC – RESEARCH WORK ON RESEARCH OF PLASMA COATINGS

Rubtsova O.A., first year student of master's degree, e – mail: oksana.rubtsova@ya.ru

Kuchumova I.D., first year student of master's degree, e – mail: ivannakz@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, prospekt K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

In this paper, the cost of conducting a scientific study of the coating from powder 85Ni15Al on the select of the optimal regime coating was determined. The main principle was the principle of completeness of evaluation and hope for its reliability. The methodology for estimating costs was chosen on the basis of this principle. When calculating the current costs for the study of plasma coatings, the Pareto law is used. Current costs of research are 142,698.

Keywords: economic calculation of scientific research, planning.

УДК 658.1

**РАСЧЕТ СТОИМОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРЕТИРОВАННЫХ
УГЛЕРОД – ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ**

*БЕРДЮГИНА И. С., магистрант 1 года обучения,
БАННОВ А. Г., канд. техн. наук, доцент каф. ХХТ
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Бердюгина И.С. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e – mail: irina_berdugina@mail.ru

Аннотация

В данной статье приведен расчет стоимости производства одного килограмма электретиrowанного углерод – эпоксидного композита, применяемого в качестве защитного антикоррозионного покрытия в химической и нефтехимической промышленности. Было проведено сравнение стоимости предлагаемого покрытия с прямыми и косвенными аналогами, пользующимися большим спросом на мировом и Российском рынке. Расчет стоимости электретиrowанного углерод – эпоксидного антикоррозионного покрытия проведен без учета общепроизводственных расходов.

Ключевые слова: расчет себестоимости, электретиrowанные углерод-эпоксидные композиты, антикоррозионные покрытия.

Введение

Проблема защиты трубопроводов и оборудования от коррозии стоит достаточно остро. Одной из причин выхода из строя трубопроводов и аппаратов в химической, нефтехимической промышленности и нефтегазовой промышленности является коррозионное растрескивание (до 60 % отказов). Воздействие коррозионного растрескивания усиливается при нарушении изоляции металлических поверхностей и воздействии электрохимической коррозии. Создание эпоксидных композиционных покрытий, устойчивых к воздействию коррозионно-агрессивных сред, позволяет защитить такие объекты от коррозии и продлить срок их эксплуатации. Решением данной проблемы и новым подходом в этом направлении является разработка технологии получения электретиrowанных эпоксидных композитов на базе углеродных наноматериалов (содержание наполнителя, до 5 масс. %). В качестве связующего компонента используется эпоксидное связующее на базе бисфенола А. Композит, полученный при воздействии коронного разряда, обладает электретиrowанными свойствами, которые позволяют решить следующий ряд проблем:

1. повысить устойчивость композита по отношению к набуханию в нефтепродуктах и агрессивных жидкостях;
2. увеличить диапазон рабочих температур;
3. определенная концентрация наполнителя (2,5 – 5 масс. %) предоставляет возможность переводить композит в антиэлектростатическое состояние (удельная проводимость $10^{-6} - 10^{-8}$ См/м), в котором он способен поглощать статическое электричество, тем самым снижая скорость электрохимической коррозии за счет рассеяния заряда.

Исследования в данной области являются передовыми и имеют большую практическую значимость, поскольку разработанные эпоксидные композиционные покрытия, устойчивые к воздействию коррозионно-агрессивных сред, позволят защитить трубопроводы и оборудование от коррозии и продлить срок их службы. Определение себестоимости производства одного килограмма электретиrowанного углерод-эпоксидного композита (ЭЭК) является важной задачей для определения целесообразности производства данного продукта.

Данный фактор будет решающим для определения затрат на производства данной продукции, определения необходимости закупки или усовершенствования оборудования, установления цены на выпускаемую продукцию, а также определения является ли данное производство конкурентоспособным.

Определение стоимости электретирированного углерод – эпоксидного композита

При расчете себестоимости важно учитывать все текущие расходы предприятия, направленные на производство и реализацию товаров. Кроме учета стоимости сырья, необходимого для производство готового продукта, учитываются затраты на энергоносители, оборудование и технику, заработную плату персонала, а также затраты на общепроизводственные расходы (аренду помещения, рекламу, административные расходы и амортизацию) [1]. На практике себестоимость единицы продукции определяется делением общей суммы произведенных затрат, понесенных цехом (подразделением) за определенный промежуток времени, на количество единиц готовой продукции, произведенной за этот промежуток. В работе определение себестоимости продукции осуществлялось без учета затрат на общепроизводственные расходы, поскольку определение данной статьи расходов запланировано на дальнейшую работу. При изготовлении ЭЭК используются эпоксидная смола (ЭС) на базе бисфенола – А (D.E.R. 331), отвердитель – полиэтилеполиамин (ПЭПА), в качестве углеродного наполнителя возможно использование многостенных углеродных нанотрубок, нановолокнистого углерода и терморасширенного графита. Терморасширенный графит обладает хорошими механическими характеристиками [2] и наименьшей, из предложенных углеродных наполнителей, стоимостью. Масовое соотношение составляющих компонентов ЭЭК (ЭС: ПЭПА:ТРГ) равна 6:1:0,15. В табл. 1 приведены затраты на сырье, необходимое для производства 1 кг ЭЭК. Приготовление электретирированных эпоксидных композитов осуществляется следующим образом. В аппарат с мешалкой, оснащенной теплообменной рубашкой, поступают компоненты композита, далее в течение 30 мин производится гомогенизация смеси с последующим нанесением покрытия и его электретирированием. Мощность применяемого аппарата с мешалкой составляет 0,55 кВт, примерная стоимость равна 200 000 руб³. После нанесения покрытия, трубопровод помещается в коронный заряд для придания покрытию электретирированных свойств. Электретирирование проводится на установке с мощностью 1,2 кВт в течение 30 мин. Получение ТРГ осуществляется в печи муфельного типа номинальной мощностью 1,8 кВт, за счет термического расширения интеркалированного графита марки EG – 350 – 50. Нагрев производится по температурному режиму от 25°С до 500° С с постоянной скоростью нагрева 20° С/мин в течение 24 мин

Таблица 1

Затраты на сырье

| | Цена за кг, руб. | Источник | Масса, кг | Стоимость, руб. |
|-----------------------|------------------|--|---|-----------------|
| ЭС D.E.R. 331 | 370 | НГК – Сибирь [3] | 0,83916 | 310,49 |
| ПЭПА | 440 | НГК – Сибирь | 0,13986 | 61,54 |
| ТРГ | 250 | ГК «Химические системы» ⁴ [4] | 0,020979 (не расширенный – 0,026589) ⁵ | 6,65 |
| Затраты на компоненты | | | | 378,68 |

³ Расчет данной установки был проведен в ходе написания выпускной квалификационной работы.

⁴ Данные о стоимости продукции были получены посредством связи с менеджером компании.

⁵ При терморасширении интеркалированного графита наблюдаются потери 21 % от массы.

В табл. 2 приведены затраты электроэнергии для производства 1 кг ЭЭК. По данным Федеральной службы по тарифам [5] стоимость 1 кВт·ч составляет 2,42 руб.

Таблица 2

Затраты на потребляемую мощность

| | Мощность, кВт | Время работы, ч | Затраты на электроэнергию, кВт·ч | Затраты на энергию, руб. |
|---------------------------------|---------------|-----------------|----------------------------------|--------------------------|
| Печь муфельная | 1,8 | 0,4 | 0,72 | 1,74 |
| Аппарат с мешакой | 0,55 | 0,5 | 0,275 | 0,6655 |
| Устройства для электретирования | 1,2 | 0,5 | 0,6 | 1,45 |
| ИТОГО | 3,55 | 1,4 | 1,595 | 3,855 |

Одним из важных критериев в расчете себестоимости производства являются расходы на заработную плату, а также на ремонт оборудования. При расчете заработной платы учитывается средняя часовая ставка, длительность изготовления продукции, а так же затраты на ремонт оборудования. Проведенные предварительные расчеты производительности и объема аппарата предназначенного для производство эпоксидного компаунда показали, что одновременная загрузка аппарата составляет 2500 кг, при учете, что на производство 2,5 т покрытия затрачивается около 0,5 ч, в таком случае примем, что затраты заработной платы на производство одного килограмма композита составляют 0,0004 от средней часовой ставки. Однако на нанесение, среднее время нанесения покрытия на 1 м² поверхности оборудования и трубопровода, составляющее 20 мин, и последующее электретирование ЭК считаем без учета поправки на производство одного килограмма покрытия. Данные по этим статьям расхода представлены в табл. 3.

Таблица 3

Прямые и накладные переменные затраты на производство

| Наименование статьи затрат | Сумма, руб. | Комментарии |
|---|------------------|--|
| Основная заработная плата | 122,5588 | Средняя часовая ставка ⁶ умножается на трудоемкость изготовления одного метра биметаллической трубы 147руб./час * 0,0004 час+ 147руб./час * 0,83час= 122,5588 руб. |
| Дополнительная заработная плата | 12,5588 | 10% от основной на оплату отпусков |
| Накладные переменные затраты | | |
| На подготовку производства | 37,6764 | 30% от основной заработной платы |
| На ремонт оборудования | 33,08421 | 40% стоимости оборудования за весь срок службы $((200000*0,4) / (167,25*12))*0,83 = 33,08421$ |
| Общехозяйственные расходы | 37,6764 | 30 % основной заработной платы |
| Суммарные расходы на прямые и накладные переменные затраты | 243,55461 | |

⁶Средняя заработная плата в Новосибирске составляет 26000 рублей [6]. Среднее число рабочих часов в месяц равно 167,25.

Проведенные предварительные расчеты затрат на производство ЭЭК, позволяют определить себестоимость продукции, а также сравнить ее с аналогами. Определение значения себестоимости, стоимости, а также прибыли ЭЭК приведено в табл. 4.

Таблица 4

Себестоимость одного килограмма электретирированного эпоксидного композита

| Наименование статьи затрат | Затраты, руб |
|---|--------------|
| Сырье | 378,68 |
| Потребляемая мощность | 3,855 |
| Прямые и переменные затраты на производство | 243,5546 |
| Себестоимость | 625,7896 |
| Стоимость ЭЭК с учетом добавочной стоимости, 18 % | 738,43 |
| Прибыль | 112,64 |

Результаты и обсуждения

Мониторинг рынка защитных антикоррозионных покрытий, показал, что большим спросом обладают порошковые эпоксидные покрытия, покрытия на основе экструдированного полиэтилена и цинковые покрытия. Сравнительные характеристики стоимости, способа нанесения и экономичности использования покрытий приведены в табл. 5.

Таблица 5

Сравнение ЭЭК с аналогами

| Покрытие | Стоимость, руб/кг | Способ нанесения | Толщина покрытия, мм |
|---|-------------------|------------------------------------|----------------------|
| Электретирированные эпоксидные покрытия | 738,43 | кисть, валик, распыление | 0,25 |
| ООО «КОМТЭК» порошковые эпоксидные покрытия | 1499,20 | Распыление | 0,35 |
| ООО «КОМТЭК» покрытия на основе экструдированного полиэтилена [7] | 490,80 | метод боковой экструзии | 2,2 |
| Барьер-цинк (Цинкор) [8] | 1052,94 | кисть, валик, окувание, распыление | 0,06 |

Таким образом, видно, что электретирированные эпоксидные покрытия обладают большим количеством способов нанесения покрытия малым расходом композита. Стоимость ЭЭК имеет среднее значение среди конкурентов в области изготовления антикоррозионных покрытий.

Выводы

Основное преимущество расчета заключается в упрощении и точности исчисления себестоимости. Расчет себестоимости позволяет получить представление обо всех затратах, которые несет организация в связи с производством и реализацией одной единицы продукции, определить порог рентабельности, провести сравнительный анализа рентабельности различных видов продукции, определения оптимальной программы выпуска и реализации продукции. Было установлено, что электретирированные углерод – эпоксидные композиции обладают высоким экономическим потенциалом для

внедрения, что в совокупности с большим числом технологических приемов их нанесения делает их применение очень перспективным по сравнению с существующими аналогами.

Список литературы

1. Низовкина, Н. Г. Управление затратами предприятия (организации) : учебное пособие для академического бакалавриата / Н. Г. Низовкина. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство Юрайт, 2017. – 185 с. – (Университеты России). – ISBN 978-5-534-03048-8.
2. Влияние параметров синтеза на характеристикитемрасширенного графита / Ю. П. Стексова, И. С. Бердюгина, А. А. Шibaев, А. В. Ухина, Е. А. Максимовский, М. В. Попов, А. Г. Баннов // Журнал прикладной химии. - 2016. - Т. 89, № 10. - С. 1265 – 1273.
3. НКГ. Каталог товаров [электронный ресурс] - http://www.igco.ru/shop/smoly/epoksidnye_smoly/331der_smola_epoksidnaya/ (дата обращения 13.09.2016).
4. Химические системы. GraftEG350 [электронный ресурс] - <http://chemsystem.ru/catalog/81> (дата обращения 13.09.2016).
5. Департамент по тарифам Новосибирской области. Приказ. [электронный ресурс] - http://www.tarif.nso.ru/sites/tarif.nso.ru/wodby_files/files/page_84/prikaz_no_520-ee_ot_27.12.2016.pdf (дата обращения 19.03.2017).
6. Средние зарплаты по России [электронный ресурс] - <https://person-agency.ru/salary.html> (дата обращения 20.11.2015).
7. Комтек. Прейскурант розничных цен на покрытия труб с 15 ноября 2016 г. [электронный ресурс] - <http://30732.ru/Price.pdf> (дата обращения 17.03.2017).
8. Цинкор. Барьер-цинк – краска для холодно цинкования металла [электронный ресурс] - http://www.zincor.ru/product/cinkovaya_kraska_barier-cink/ (дата обращения 17.03.2017).

CALCULATION OF VALUE OF PRODUCTION OF ELECTRETED CARBON – EPOXY COMPOSITES

Berdyugina I. S. Master student, e – mail: irina_berdugina@mail.ru

Bannov A. G.¹ C.Sc. (Engineering), Associate professor, e – mail: bannov.alexander@gmail.com

Novosibirsk State Technical University, prospekt K. Marksa,20, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The calculation of the cost of production of one kilogram of electret carbon-epoxy composite, which is used as a protective anticorrosive coating in the chemical and petrochemical industry is presented in the article. The cost of the proposed coating was compared with direct and indirect analogues, which have a great demand in the world and Russian markets. The calculation of the cost of an electreted carbon-epoxy anticorrosive coating was carried out taking into account the general production costs.

Key words: calculation of prime cost, electreted carbon-epoxy composites, anticorrosion coatings.

**РАСЧЁТ СТОИМОСТИ ПРОИЗВОДСТВА САМОФЛЮСУЮЩЕГОСЯ
ПОКРЫТИЯ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ
ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО – ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ**

*ИВАНОВА А. В., магистрант 1 года обучения
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Иванова А.В. – 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
е – mail: alina_711@inbox.ru

Аннотация

В данной статье приведён расчёт стоимости наплавки самофлюсующегося порошка, легированного карбидом кремния на стальную основу размерами 1 x 1 м² для получения износостойкого покрытия. Полученные данные стоимости были сравнены со стоимостью стали 95X18 с такими же габаритными размерами.

Ключевые слова: расчёт себестоимости, наплавка, самофлюсующееся покрытие.

Введение

Самофлюсующиеся покрытия, легированные карбидом кремния, имеют намного большую долговечность, чем обычные износостойкие и коррозионностойкие стали, поэтому для деталей, работающих в условиях интенсивного износа целесообразно применять конструкционную сталь с наплавленным на нее самофлюсующимся покрытием.

Экономический эффект — разность между результатами деятельности хозяйствующего субъекта и произведенными для их получения затратами на изменения условий деятельности. Результат является абсолютным показателем и измеряется в денежных единицах. Для того чтобы получить эффект, необходимо осуществить какие-либо затраты. Далее получается дополнительный доход от внедрения мероприятия.

Цена достижения результата не менее важна, чем сам результат. Один и тот же эффект может быть получен разными способами и с разными затратами. Соизмеримость эффекта и затрат на его достижение - основа экономической эффективности [1].

Методика определения стоимости самофлюсующегося покрытия

Для расчета себестоимости износостойкого покрытия на основе самофлюсующегося порошка ПН77Х15СЗР2 с добавлением карбида кремния, наплавляемого на сталь 10 с размерами 1x1 м, необходимо учитывать:

- C_m – затраты на сырье и основные материалы,
- ФОТ – фонд оплаты труда (основная и дополнительная заработная плата и отчисления на социальные нужды),

- $C_{эл}$ – затраты на электроэнергию при наплавке,
- $C_{ам}$ – отчисления на амортизацию оборудования.

Стоимость листа стали 10 с размерами 1 x 1 x 0,0015 м – 1000 руб.,

Цена порошка ПН77Х15СЗР2 – 2500 р/кг.,

Цена порошка SiC – 1100 р/кг.,

Плотность насыпки $\rho = 0,45 \text{ г/см}^2 = 4,5 \text{ кг/м}^2$.

В первом случае карбид кремния должен занимать 10 % объема наплавляемого порошка, во втором – 5 %.

Тогда затраты на порошок, содержащий 10 % SiC и 90 % ПН77Х15С3Р2 составят:
 $4,5 \times (2500 \times 0,9 + 1100 \times 0,1) = 10620$ руб.

Таким образом, $C_{M1} = 10620 + 1000 = 11620$ руб.

Для 5 % SiC и 95 % ПН77Х15С3Р2: $4,5 \times (2500 \times 0,95 + 1100 \times 0,05) = 9990$ руб.

$C_{M2} = 10935 + 1000 = 11935$ руб.

Ширина сканирования луча 50 мм. Чтобы наплавить покрытие на 1x1 м необходимо сделать 25 проходов, каждый пройденный проход будет перекрываться следующим на 10 мм.

Скорость сканирования луча $v = 15$ мм/с.

Время процесса наплавки $T = \frac{1000 \times 25}{15} = 1666,67$ с ≈ 28 мин.

Основная заработная плата рабочего по одному изделию ($ЗП_0$) определяется по формуле 1.1:

$$ЗП_0 = t \times T_c \quad (1.1),$$

где t – фактически отработанное на производстве время,

T_c – часовая тарифная ставка рабочего (100 руб.) [2].

Фактически отработанное на производстве время составляет 30 мин, следовательно: $ЗП_0 = 50$ руб.

К дополнительной заработной плате относятся премии и надбавки, оплата вредности и отпусков). Она составляет 25 % от основной $ЗП_0$

$ЗП_д = 50 \times 0,25 = 12,5$ руб.

Начисленная зарплата определяется с помощью районного коэффициента по формуле 1.2:

$$ЗП_н = K_p \times (ЗП_0 + ЗП_д) \quad (1.2),$$

где K_p – районный коэффициент (1,25).

Таким образом:

$ЗП_н = 1,25 \times (50 + 12,5) = 78,125$ руб.

30 % от основной и дополнительной зарплате составляют страховые взносы, которые рассчитываются по формуле 1.3:

$$СВ = (ЗП_0 + ЗП_д) \times 0,3 \quad (1.3),$$

Тогда, $СВ = 0,3 \times (50 + 12,5) = 18,75$ руб.

ФОТ = $ЗП_0 + ЗП_д + СВ = 50 + 12,5 + 18,75 = 81,25$ руб.

После вычета 13 % налога ФОТ = 70,49 руб.

Затраты на электроэнергию определяется по формуле 1.4:

$$C_{эл} = C_k \cdot W \cdot T \quad (1.4),$$

где C_k – стоимость одного кВт/ч (2,34 руб.),

W – потребляемая мощность, которая равна произведению установленной мощности P на коэффициент использования оборудования K_c ,

T – полезный фонд времени работы оборудования, выраженный в часах.

$P = 100$ кВт,

$K_c = 0,85$,

$W = 100 \times 0,85 = 85$ кВт,

$T = 28$ мин = 0,47 ч,

$C_{эл} = 2,34 \times 85 \times 0,47 = 93,48$ руб.

Для определения суммы амортизации, начисленной за один месяц в отношении объекта основных средств, следует первоначальную стоимость основного средства умножить на определенную для этого объекта норму амортизации, которая определяется по формуле 1.5:

$$K = \frac{1}{n} \times 100 \% \quad (1.5),$$

где K - норма амортизации в процентах к первоначальной стоимости объекта амортизируемого имущества,

n - срок полезного использования объекта.

Срок полезного использования ускорителя 25 лет.

$K = 1/25 \times 100 \% = 4 \%$ в год,

Сумма ежедневных амортизационных отчислений составит:

$$C_{ам} = \frac{K_{об} \cdot K}{100 \cdot 365},$$

где $K_{об}$ – стоимость оборудования, для наплавки используем промышленный ускоритель электронов ЭЛВ-6, его ориентировочная стоимость 25 млн. руб.

$$C_{ам} = \frac{25000000 \cdot 4}{100 \cdot 365} = 2740 \text{ руб.}$$

Технологическая себестоимость является суммой всех затрат, применяемых при изготовлении материала:

$$C_{Т1} = C_{м1} + \text{ФОТ} + C_{эл} + C_{ам} = 11620 + 70,49 + 93,48 + 2740 = 14523,9 \text{ руб.}$$

$$C_{Т2} = C_{м3} + \text{ФОТ} + C_{эл} + C_{ам} = 10935 + 70,49 + 93,48 + 2740 = 13838,97 \text{ руб.}$$

Маржинальный доход, включающий покрытие постоянных затрат на предприятии и нормативной прибыли, принимается в размере 50 % от технологической себестоимости, таким образом:

$$П_1 = 14523,9 \cdot 0,5 = 7261,95 \text{ руб.}$$

$$П_2 = 13838,97 \cdot 0,5 = 6919,48 \text{ руб.}$$

Исходя из данных расчетов, цена изделия определяется по формуле 1.6:

$$Ц = C_T + П \quad (1.6),$$

Таким образом, цена изделия составляет:

$$Ц_1 = 14523,9 + 7261,95 = 21785,85 \text{ руб.}$$

$$Ц_2 = 13838,97 + 6919,48 = 20758,45 \text{ руб.}$$

Оценка затрат на коррозионностойкую сталь мартенситного класса с учетом сопоставимости по сроку службы

Для изготовления отдельных деталей горно-шахтного оборудования, работающих в условиях воздействия умеренных агрессивных сред и частиц абразива, применяется коррозионная сталь мартенситного класса 95X18. Износ пар трения, изготовленных из данного материала, при эксплуатации составляет 3 – 5 мм/год, что отрицательно сказывается на работоспособности оборудования в целом. Формирование на поверхности пар трения высокопрочного самофлюсующегося покрытия легированного карбидом кремния позволит увеличить долговечность материала.

Плотность данной стали – 7700 кг/м³. Стоимость килограмма стали – 290 руб. Таким образом, масса листа стали размером 1 x 1 x 0,0015 м составит:

$$m = 7700 \times 0,0015 = 11,5 \text{ кг}$$

$$\text{Стоимость листа стали} = 290 \times 11,5 = 3335 \text{ руб.}$$

Срок службы деталей машин, имеющих покрытие, в 7 раз выше, чем у деталей без покрытия.

Возьмем расчетный срок, равный одному году. Если деталь с самофлюсующимся покрытием будет работать год, то деталь без покрытия прослужит 52 дня. Затраты на коррозионностойкую сталь мартенситного класса составят: $3335 \times 7 = 23345$ руб.

Выводы

Затраты на производство материалов

| Наименование материала | Сумма, руб. |
|------------------------|-------------|
| ПН77X15C3P2 + 10 % SiC | 21785,85 |
| ПН77X15C3P2 + 5 SiC | 20758,45 |
| 95X18 | 23345 |

Затраты на сталь 95X18 больше, чем на сталь 10 с наплавленным на неё самофлюсующимся покрытием, легированным карбидом кремния на 8 – 10 %.

Таким образом, экономически эффективнее использовать самофлюсующееся покрытие с добавлением карбида кремния. Его себестоимость ниже, а детали в условиях трения работают дольше.

Список литературы

1. Низовкина Н.Г. Методологические проблемы в обосновании эффективности хозяйственных мероприятий. / Вестник НГУ. Серия: Социально-экономические науки. 2013. Т.13, вып.2 с. 176-183 (дата обращения: 5.03.2017).
2. Средние зарплаты по России - [Электронный ресурс] - <https://person-agency.ru/salary.html>] (дата обращения: 20.11.2015).

CALCULATION OF VALUE OF PRODUCTION OF NI-BASED SELF – FLUXING COATING OBTAINED BY THE NON – VACUUM ELECTRON BEAM WELDING

Ivanova A.V. Master student, e – mail: alina_711@inbox.ru

Novosibirsk State Technical University, prospekt K. Marksa,20, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

In this paper, we calculate the cost of surfacing a self-fluxing powder doped with silicon carbide onto a steel substrate of 1 x 1 m² in size to obtain a wear-resistant coating. These coatings are used to increase the hardness and wear resistance of machine parts. The obtained cost data were compared with the cost of martensitic stainless steel with the same overall dimensions.

Keywords: calculation of production costs, welding, self – fluxing.

УДК 658.5

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СМК МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТИЗАЦИИ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

*ОВЧАРЕНКО А. Г., доктор техн. наук, профессор,
ФИРСОВ А. М., канд. техн. наук, доцент
(БТИ АлтГТУ, г. Бийск)*

Овчаренко А.Г. – 659305, Бийск, ул. Трофимова, 27,
Бийский технологический институт
Алтайского государственного технического университета,
е – mail: tmk@bti.secna.ru

Аннотация

Рассмотрены пути совершенствования системы менеджмента качества применительно к машиностроительной организации. Для этого проведено исследование развития систем менеджмента качества с точки зрения Всеобщего менеджмента качества и использования стандартов организации. Особое внимание уделено требованиям безопасности продукции, как важнейшей составляющей категории качества. Проведен сравнительный анализ требований технических регламентов и нового закона «О стандартизации в Российской Федерации». Отмечаются преимущества стандартизации в условиях рыночной экономики. Необходимо разумное сочетание требований стандартов с учетом требований технических регламентов, направленных на обеспечение уровня безопасности машиностроительной продукции.

Ключевые слова: системы менеджмента качества, машиностроение, стандартизация, качество, безопасность, продукция.

Введение

Концепция национальной политики России в области качества продукции и услуг совершенно справедливо подчеркивает, что главной задачей отечественной экономики в XXI веке является рост конкурентоспособности за счет роста качества, в том числе и машиностроительной продукции.

В настоящее время основными стандартами качества являются международные стандарты ИСО серии 9000, которые установили единый, признанный в мире подход к договорным условиям по оценке систем менеджмента качества (СМК) и одновременно регламентируют отношения между производителями и потребителями продукции. Основные обобщенные требования потребителей к выпускаемой продукции: экономичность, функциональность, безопасность, эстетичность, удобство. Организации, производящие и реализующие эффективными методами высококачественную продукцию, получают неоспоримые конкурентные преимущества и, естественно, улучшают общие результаты своей деятельности.

Для обеспечения высокого качества нужно иметь хорошую технологию изготовления, высококачественные материалы и высококвалифицированный персонал, что довольно сильно повысит стоимость конечного продукта. Поэтому необходимо искать оптимальные решения в обеспечении качества продукции, особенно в такой отрасли, как машиностроение.

По своему содержанию стандарты ИСО серии 9000 отличаются тем, что не включают требования к конкретной продукции. Основная же масса требований к машиностроительной продукции изложена в нормативных документах и касается требований безопасности, взаимозаменяемости, технической совместимости, методов испытаний продукции, а также других общих и методических вопросов.

Требования к машиностроительной продукции содержат стандарты ряда общетехнических систем, таких как Система стандартов безопасности труда, Основные нормы взаимозаменяемости, надежность в технике и др. Сегодня российский фонд национальных стандартов составляет более 5 тысяч документов и в основном удовлетворяет требования потребителей и производителей продукции машиностроения. По ряду критериев он даже превосходит национальные фонды стандартов промышленно развитых стран, к примеру, Франции, Великобритании, США.

Изготовитель и его торговый посредник, стремящиеся поднять репутацию торговой марки, победить в конкурентной борьбе, выйти на мировой рынок, заинтересованы в выполнении как обязательных, так и рекомендуемых требований стандартов. В этом смысле стандарт приобретает статус рыночного инструмента.

Исследование проблемы

В истории качества можно выделить пять перекрывающихся и продолжающихся фаз, которые в соответствии с законами диалектики развивались под действием противоречий между стремлением к обеспечению качества и повышением эффективности производства с целью увеличения прибыли: 1) фаза отбраковки; 2) фаза контроля качества; 3) фаза управления качеством; 4) фаза менеджмента качества; 5) фаза качества среды [1, 2].

Современная фаза менеджмента качества является развитием предыдущей фазы в направлении более полного удовлетворения требований потребителей, когда на смену Всеобщего (контроля) управления качеством (TQC) пришла концепция Всеобщего менеджмента качества (TQM). Переход к этой фазе связан с обострением конкуренции на рынке товаров и политикой государственной защиты интересов потребителей. Фаза качества среды начала развиваться в конце XX века, когда усилилось влияние общества на предприятия, в частности, в вопросах экологичности производства. Это привело к появлению стандартов ИСО 14000, устанавливающих требования к системам менеджмента с точки зрения защиты окружающей среды.

Сертификация систем менеджмента качества на соответствие стандартам ИСО 14000 постоянно развивается. Зачастую она становится требованием партнеров при заключении контрактов. Создаются интегрированные системы качества, объединяющие требования стандартов ИСО 9000 и ИСО 14000. Таким образом, переход к фазе качества среды требует от производителей повышения уровня безопасности продукции для жизни, здоровья и имущества при ее производстве, обращении и потреблении, а также охраны окружающей природной среды (требования к экологически опасным свойствам продукции при ее производстве, обращении и потреблении).

В условиях открытых рыночных отношений принципиально меняются приоритеты и расстановка акцентов, определяющих эффективность деятельности и имидж предприятий. Сегодня нельзя рассматривать и оценивать их деятельность без учета вопросов обеспечения профессиональной, промышленной и экологической безопасности. Способность конкурировать все больше зависит от качества оказываемых услуг, культуры и дисциплины труда, надежности предприятия. Поэтому современная политика на предприятии должна быть ориентирована не только на отдельные составляющие (безопасность, качество, надежность), но и одновременно на их комплексное решение. Только при условии реализации политики, адекватной современным требованиям, предприятие может рассчитывать на успех и имеет шансы закрепить свои позиции в рыночном поле.

Ключевыми категориями системы корпоративного управления при характеристике любого предприятия становятся понятия: «качество услуг и продукции», «надежность функционирования процессов и предприятия», «безопасность человека (персонала)». Эти категории настолько тесно связаны друг с другом, что практически трудно обозначить, что из них является первичным: или качество и надежность являются необходимыми категориями и условиями безопасности, или наоборот безопасность и надежность являются показателями (свойствами) качества, формирующими его. Все они важны как с точки зрения социальной, экономической значимости, успешности деятельности, так и для формирования внутреннего и внешнего имиджа предприятия, как надежного, профессионально и экологически безопасного,

социально ответственного партнёра, обеспечивающего высокое качество оказываемых услуг. И если ранее эти понятия рассматривались независимо один от другого, то сейчас эти категории следует рассматривать во взаимосвязи.

Таким образом, под качеством понимается, в первую очередь, соответствие требованиям стандартов, надёжности, потребностям всех заинтересованных сторон, в том числе, удовлетворенность клиентов, ряд других аспектов, связанных с трудовой деятельностью. Если ранее речь шла о качестве продукции и системах управления качеством продукции, то сегодня речь идет о тотальном (всеобщем) управлении качеством в английской терминологии Total Quality Management (TQM), включающем в себя качество продуктов труда, качество процессов, деятельности, менеджмента, наконец, качество фирмы (предприятия). Безусловно, категория качества является ключевой составляющей профессиональной, промышленной и экологической безопасности, т.к. идеология обеспечения безопасности тесно связана с идеологией формирования высококачественных услуг и продукции. Более того, современная концепция управления безопасностью базируется, по сути, практически на принципах менеджмента качества.

Поэтому в контексте данной темы понятие качество рассматривается не вообще, а во взаимосвязи с безопасностью, более того, как необходимое условие безопасности. Это обусловлено тем, что категории, которые формируют качество, одновременно являются категориями безопасности. К примеру, к ним относятся: передовая (совершенная, безопасная) технология, неукоснительное отношение к установленным правилам, культура и дисциплина труда, обязательность и взаимответственность во взаимоотношениях с партнерами и собственными работниками предприятия и т.д. С другой стороны, известно, что надежность также проявляется как некоторое свойство или качество, которым обладает объект, и относится к категории безопасности. Поэтому не случайно понятия надежный и безопасный переводятся на английский язык одним словом «Safe».

В современных условиях немаловажным стимулом для внедрения инновационных технологий и решений, для их успешной реализации является экономическая сторона вопроса. К сожалению, не все поддается простой количественной оценке, тем более, что понятия безопасности, качества и надежности являются не только и не столько экономическими категориями, сколько социальными.

Мировая практика свидетельствует, что компании, принявшие и реализующие подход в системах менеджмента, который в большинстве случаев является частью всей философии менеджмента всеобщего качества (TQM), достигают особенно высоких показателей эффективности. Основная задача состоит в формировании у персонала идеологии, адекватной требованиям новейшей системы менеджмента, к числу ключевых факторов которой относятся безопасность, качество, надежность.

Машиностроение – важная отрасль экономики России. Предприятия и организации машиностроительного профиля все больше оснащаются современным производственным оборудованием, автоматизированными линиями и комплексами. Расширяется применение автоматических манипуляторов и роботов. Внедряются роботизированные технологические комплексы и участки, гибкие производственные системы. В процессе освоения современного высокотехнологичного оборудования должны решаться взаимосвязанные задачи: обеспечение выпуска качественной продукции, обеспечение безопасности производственного процесса и выпускаемой продукции.

В настоящее время требования безопасности устанавливаются техническими регламентами в соответствии с Федеральным законом «О техническом регулировании» [3]. С 2015 года вступил в силу Федеральный закон «О стандартизации в Российской Федерации» [4], который устанавливает правовые основы стандартизации в Российской Федерации. Ранее вышедший закон «О техническом регулировании» также устанавливает определенные правовые основы стандартизации в Российской Федерации. Внешне перечень целей стандартизации в обоих законах во многом совпадает: это улучшение качества жизни населения страны, повышения уровня безопасности жизни и здоровья граждан, повышение конкурентоспособности и качества продукции. Однако необходимо отметить ряд противоречий в принятых законах. Закон «О стандартизации в Российской Федерации» изменил правовой статус стандартов и добавил некоторые категории стандартов, не предусмотренных законом «О техническом регулировании».

Понятие «стандартизация» утратила нормативный (обязательный) характер этой деятельности, результаты стандартизации (национальные стандарты) применяются только в добровольном порядке, за исключением ряда объектов стандартизации (продукции по государственному оборонному заказу, продукции, сведения о которой составляют государственную тайну, продукции, для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии т.п.). При этом в законе «О техническом регулировании» установлено только две категории стандартов: национальный стандарт и стандарт организации. В то время как в законе «О стандартизации в Российской Федерации» помимо национального стандарта и стандарта организации, к документам по стандартизации относятся общероссийские классификаторы, своды правил, документы по стандартизации, устанавливающие обязательные требования в отношении объектов стандартизации, а также технические условия. Технические условия - вид стандарта организации, утвержденный изготовителем продукции, устанавливающий требования к качеству, безопасности выпускаемой конкретной продукции и методам ее контроля. Стандарты организаций и технические условия разрабатываются с учетом соответствующих документов национальной системы стандартизации.

В качестве дальнейшего развития добровольной стандартизации интересен опыт стандартизации в США. Система стандартизации США имеет существенные отличия от аналогичных систем, функционирующих в различных странах-членах ВТО, включая Россию, что обуславливает целесообразность более детального ознакомления с ней. Центральное место в национальной системе стандартизации США занимают добровольные консенсусные стандарты. Такие стандарты разрабатываются по заказу производителей товаров, органов власти, органов власти штатов и прочих заинтересованных лиц. В настоящее время в США функционирует более 600 неправительственных организаций, разрабатывающих стандарты [5].

Результаты и обсуждения

Для продукции машиностроения стандартизация как никогда является актуальной. При этом система менеджмента качества находит достойное место при выпуске высококачественной продукции, одной из основных причин снижения качества является недостаточное управление качеством на основе стандартизации, в частности разработки и использования стандартов организации в ведущих отраслях машиностроения [6].

В связи с выходом закона «О стандартизации в Российской Федерации» сегодня стандартизация в управлении качеством - это очередной этап в поисках работоспособного механизма придания управленческой деятельности более четкой целевой направленности, повышения ответственности за результаты труда всех участников управленческого процесса. Учитывая, что основной задачей является повышение уровня качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции, на предприятиях машиностроения совершенствование стандартизации в СМК должно производиться в соответствии со смещением акцентов применения стандартов из обязательной области в добровольную.

Вместе с тем стандарт организации – это мощное средство повышения уровня качества предметной деятельности, которое приводит к искомому результату. В пользу необходимости развертывания работ по созданию стандартов организации (СТО) можно привести следующие аргументы:

- стандартизация деятельности способствует наведению порядка в организации в соответствии с международными требованиями стандартов ИСО серии 9000;
- коллективу известны правила и требования, которые изложены в разработанных документах СМК, а также требованиях конкретного СТО;
- разработка документов СМК требует привлечения к этому процессу широкого круга специалистов, таким образом, формируется группа единомышленников, ориентированных на успех, развитие, процветание, повышение конкурентоспособности предприятия;

- документирование процессов позволяет фиксировать накопленный опыт в организации.

Стандарты организаций должны разрабатываться и перерабатываться на основе лучшего опыта, распространяемого в виде национальных, международных и межгосударственных стандартов. Для этого на каждом предприятии должны действовать процедуры, регламентирующие порядок применения нормативных документов внешнего происхождения, в том числе национальных, международных и межгосударственных стандартов, нормативных документов заказчиков и вышестоящих организаций.

В реальных ситуациях ведения бизнеса конкурентоспособность и безопасность более связаны между собой, чем противоречат друг другу. Это выражается в том, что в сфере конкуренции на первый план выдвигается неценовая конкуренция: более безопасная и надежная продукция оказывается более конкурентоспособной. У производителя или инвестора как у лица, принимающего решения, есть три варианта стратегии: 1) попытка избежать риска - фактически это полный отказ от использования наукоемких и опасных технологий; 2) пренебрежение риском - стратегия предполагает, что владелец объекта сознательно идет на риск и занимается бизнесом до тех пор, пока убытки от последствий наступивших технических рисков не приведут к невозможным потерям; 3) управление риском (его выявление и оценка), в настоящее время такая стратегия признается ведущей в экономике, так как дает возможность получать гарантированную прибыль [7].

В ряде работ предлагается механизмы, предусмотренные законом «О техническом регулировании», использовать при построении системы менеджмента безопасности продукции в машиностроении [8]. При этом авторы ссылаются на систему менеджмента безопасности движения поездов в ОАО «РЖД», систему менеджмента информационной безопасности в соответствии с требованиями стандарта ISO/IEC 27001:2013, а также систему НАССР, которая получила наибольшее признание в мире с позиций результативности управления краткосрочными рисками, связанными с пищевой продукцией. На наш взгляд, требования безопасности к машиностроительной продукции должны найти отражение в стандартах организации и основополагающих документах СМК организации. При этом технические регламенты, за выполнение требований которых отвечает государство, направлены на обеспечение безопасности, тогда как стандарты, за соблюдение требований которых отвечает бизнес-сообщество, нацелены, в первую очередь, на обеспечение конкурентоспособности продукции. Очевидно, что требования стандартов не должны противоречить требованиям технических регламентов и, тем самым, повышению уровня безопасности. Таким образом, необходимо научиться строить «виртуальную границу» между этими двумя группами требований при задании их в соответствующих документах [9].

Выводы

В наше время трудно представить становление и развитие нового машиностроительного производства, его функционирование и деятельность без требований стандартов. Стандартизация играет важную роль в развитии производства, а без технического регулирования не было бы разработки, принятия, применения и исполнения обязательных требований к продукции и процессам производства.

Переход страны к рыночной экономике с присущей ей конкуренцией, борьбой за доверие потребителей заставляет специалистов шире использовать методы и правила стандартизации в своей практической деятельности для обеспечения высокого качества товаров, работ и услуг.

Законопроект «О стандартизации в Российской Федерации» может быть полезен российскому бизнесу и открывает новые возможности для участия малого и среднего бизнеса в процессе разработки стандартов, содействует развитию малого и среднего бизнеса за счет предложения стандартных апробированных решений, повышения доверия к продукции небольших предприятий, обеспечивает повышение культуры производства и качества продукции и услуг.

Список литературы

1. Всеобщее управление качеством : учебник / В.Н. Азаров, В.П. Майборода, А.Ю. Панычев, Ю.А. Усманов . – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. - 572 с.
2. Управление качеством продукции машиностроения : учеб. пособие / М. М. Кане, А. Г. Суслов, О. А. Горленко и др.; под общ. ред. М. М. Кане. - Москва : Машиностроение, 2010. - 416 с.
3. Федеральный закон Российской Федерации от 27.12.2002 г. № 184 – ФЗ «О техническом регулировании».
4. Федеральный закон Российской Федерации от 29.06.2015 г. №162 – ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации» .
5. Аронов И.З., Салматов В.Ю. Национальная система стандартизации США. Опыт работы в условиях ВТО / И.З. Аронов, В.Ю. Салматов // Стандарты и качество. – 2013. – № 9. – С. 44 – 48.
6. Барвинок В.А., Чекмарёв А.Н., Еськина Е.В. Управление качеством на предприятиях авиационно-космического кластера на основе стандартизации // Вектор науки ТГУ. – 2014.- № 3 (29). – С.39 – 46.
7. Александровская Л.Н., Аронов И.З., Елизаров А.И. и др. Статистические методы анализа безопасности сложных технических систем. — М.: Логос, 2001. – 232 с.
8. Вавилин Я.А. Технология обеспечения безопасности изделий / Я.А. Вавилин, Д.А. Суслов // Научно-коёмкие технологии в машиностроении. – 2015. – №5(47). – С. 29 – 33.
9. Аронов И.З. Качество продукции и безопасность – что первично? / И.З. Аронов // Стандарты и качество. – 2006. – № 1. – С. 34 – 37.

IMPROVEMENT OF THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM OF MACHINE BUILDING ORGANIZATION THROUGH THE STANDARDIZATION OF PRODUCT QUALITY

Ovcharenko A.G., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: tmk@bti.secna.ru

Firsov A.M., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e – mail: firsov.am@yandex.ru

Biysk Technological Institute, Trofimova str. 27, Biysk, 659305, Russian Federation

Abstract

Ways of improving the system of quality management as applied to machine building organizations are considered. The development of quality management systems from the point of view of the overall quality management and utilization standards are investigated. Special attention was paid to the requirements of product safety as a critical part of quality. A comparative analysis of the requirements of technical regulations and the new law "On standardization in Russian Federation" revealed the benefits of standardization in a market economy. Requires a reasonable combination of requirements of the standards subject to the requirements of technical regulations, aimed at ensuring the level of safety of engineering products.

Keywords: system of quality management, machine building industry, standardization, quality, safety, products.

УДК 616.345.56

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УСЛОВИЙ ТРУДА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*ДЕЙНЕКА И. Г., доктор техн. наук, профессор,
САЛО В. И., канд. техн. наук, доцент,
ПРОНИНА Ю. Г., ассистент
(ЛНУ им. В.Даля, г. Луганск, ЛНР)*

Дейнека И.Г. – 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20 а,
ГОУ ВПО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля»,
e-mail: pjpg82@mail.ru

Аннотация

Уровни производственного травматизма и профессиональных заболеваний являются основными показателями состояния охраны труда на производстве, в регионе, государстве и любой сфере экономической деятельности. В последние годы на фоне повышения технической оснащенности производства и улучшения условий производственной среды более отчетливо выступает необходимость учета влияния напряжения физиологических функций организма в процессе труда, как одного из важных факторов, который определяет работоспособность и здоровье человека. Перенапряжение отдельных органов и систем неблагоприятно сказываются на состоянии организма человека и снижают эффективность труда, поэтому физическая составляющая занимает пока еще значительный удельный вес в отрасли машиностроения. Поэтому возникает необходимость в исследовании сочетанного влияния психофизиологического состояния человека-оператора и его безопасности в процессе трудовой деятельности.

Ключевые слова: охрана труда, травматизм, условия труда, категория тяжести труда, вредные и опасные производственные факторы, машиностроение.

Постановка проблемы

Под полной безопасностью труда человека в производственных условиях понимают сочетание трех факторов безопасности – оборудования, технологического и трудового процессов. Возможность получения «человеком-оператором» производственной травмы зависит от особенностей рабочего места, условий, которые характеризуют напряженность и тяжесть труда, психофизиологических качеств работника и сочетания целого ряда других конкретных факторов. Анализ влияния как опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ), так и качеств и возможностей человека-оператора в реальной динамике производства является сложной инженерной задачей.

В настоящее время выделяют три основных типа причин [1 – 5] среди всех классификаций причин производственного травматизма. К первым относят технические причины, зависящие от несовершенства технологических процессов, использования физически и морально изношенного, устаревшего оборудования. Вторые – это организационные, которые определяются уровнем организации труда на рабочем месте и на предприятии в целом. Третьи – личностные или психофизиологические причины, к которым можно отнести физические и нервно-психические перегрузки работника, приводящие к ошибочным действиям, перенапряжение анализаторов (умственных, зрительных, слуховых, тактильных), монотонность труда, стрессовые ситуации, болезненное состояние, утомление, вызываемое большими физическими (статическими и динамическими) нагрузками. К травмам также может привести несоответствие анатомо-физиологических и психических особенностей организма человека характеру выполняемой работы. Кроме этого во многих технических системах,

в конструкциях машин, приборах и системах управления еще недостаточно учитываются психофизиологические особенности и возможности человека.

Практически все несчастные случаи вызываются множественными причинами и «случайным» совпадением событий, но в первую очередь нарушениями требований охраны труда допущенными работниками и работодателями. Считается, что в современном производстве квалифицированный работник все реже может попасть в непредвиденную ситуацию с «неизвестными» требованиями безопасности, но все чаще открыто нарушаются правила безопасности или неразумным поведением создается опасная ситуация. В современном сложном для работника производстве совместное действие безопасных по отдельности, по своим параметрам, факторов может в определенных условиях привести к возникновению опасной, критической или аварийной ситуации, а связующим звеном такого сочетания является, как правило, работники, на поведение которых влияют и условия труда.

Анализ показывает, что в последние годы все чаще на первый план выходят проблемы психологического и физиологического напряжения работника, оттесняя на задний план необходимость совершенствования традиционных условий труда, связанных с воздействием физических факторов окружающей среды (температуры, влажности, света, шума, вибрации и загрязненной атмосферы). Это вызывается относительным снижением физических нагрузок на человека одновременно с ростом его психологических и физиологических нагрузок. Итог известен – хроническая усталость, умственная и психологическая перегрузки, обострение отношений с другими работниками и руководством. При этом физиологическое и психологическое утомление сопровождается ухудшением качества работы, болезнями, потерей концентрации внимания и координации движений, потерей осторожности и осмотрительности. Все это существенно повышает риск травмирования в тех же физических условиях рабочего места.

Целью работы является анализ методики оценки тяжести условий труда на рабочих местах на примере действующего машиностроительного производства, а также оценка условий труда по психофизиологическим факторам в соответствии с нормативными требованиями.

Результаты исследований

Для разных видов трудовой деятельности существуют различные методы оценки их тяжести. Тяжесть физического труда может быть оценена по нагрузке, которой подвергаются мышцы человека. При этом показатель тяжести труда должен учитывать «разноплановое» воздействие всех элементов условий труда при различных формах деятельности. Изменения в организме работников одинаковые по тяжести могут вызываться разными причинами. Это могут быть ОВПФ, чрезмерная физическая нагрузка, дефицит движений и т.п., а также различное сочетание этих причин. Тяжесть труда должна характеризовать совокупное воздействие всех элементов, включая условия труда человека, его работоспособность, здоровье, жизнедеятельность и восстановление рабочей силы. В такой интерпретации понятие тяжести труда одинаково применимо как для умственного, так и для физического труда.

В зависимости от происхождения все факторы производственной среды делятся на физические, психологические и психофизиологические. При выполнении технологических процессов в помещениях цехов предприятия существуют или могут возникнуть следующие физические факторы: движущиеся машины и механизмы; части производственного оборудования и/или изделий, которые передвигаются; повышенная или пониженная температура, влажность и скорость движения воздуха; чрезмерная запыленность и загазованность воздуха; недостаточная освещенность рабочего места; повышенный уровень шума, вибрации, электромагнитных полей, статического электричества; опасность поражения электрическим током и др. К психологическим вредным факторам, влияющим на работников во время рабочей смены, можно отнести физические и нервно-эмоциональные (статические и динамические) перегрузки, монотонность труда, умственное напряжение, перенапряжение анализаторов и т.п.

В табл. 1 по результатам аттестации рабочих мест действующего машиностроительного предприятия дана сравнительная оценка фактического состояния условий труда.

Проведенный анализ условий труда на рабочих местах в действующем производстве показал, что физическая нагрузка (динамическая и статическая), а также время нахождения в неудобной рабочей позе значительно превышают нормативные требования на рабочих местах электросварщиков, газосварщиков, маляров, аккумуляторщиков и др., поэтому необходимо провести оценку тяжести труда для расчета размера компенсаций и льгот работникам и дальнейшей разработки мероприятий по устранению выявленных отклонений.

Таблица 1

Сравнительная оценка фактического состояния условий труда на рабочих местах в машиностроении с нормативными требованиями по психофизиологическими факторами

| № п/п | Цех, должность, профессия | № рабочего места | № аналогичн. места | Тяжесть труда | | | | Рабочая поза | | |
|-------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|-------|------------------|-------|--------------|--------|--|
| | | | | Динамич. работа | | Статич. нагрузка | | норма | факт | |
| | | | | норма | факт | норма | факт | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 2 | ХШ | | | | | | | | | |
| 2.5 | газосварщик | 8-20 | | | | 18001-43000 | 42750 | 25% | 43,70% | |
| 2.6 | паяльщик | 6-22;6-26; 6-28;6-41; 7-11;7-12 | 6-38;6-39; 6-42;6-50; 6-51;6-52 | | | 18001-43000 | 61560 | 25% | 47,90% | |
| 2.16 | маляр | 6-10 | 100 | | | 18001-43000 | 51300 | | | |
| 3 | МСЦ | | | | | | | | | |
| 3.1 | аккумуляторщик | 1 | 4 | 37-63 | 67 | | | 25% | 47,90% | |
| 3.2 | медник | 68 | 3;67; 69;...;71 | | | 18001-43000 | 43500 | 25% | 33% | |
| 3.3 | гальваник | 10 | 3;9;15 | 18-30,5 | 39,48 | | | | | |
| 3.5 | электрогазосварщик | 39 | 38 | | | 18001-43000 | 40800 | 25% | 48% | |
| 3.9 | гидропескоструйщик | 20 | 17;...;19 | 23-45 | 72,8 | 43001-97000 | 70632 | | | |
| 3.10 | термист | 15;25;26 | 29;...;31;33 | 41-90 | 112,5 | | | | | |
| 3.11 | маляр | 1 | | | | 18001-43000 | 91134 | 25% | 67,70% | |
| 3.13 | шлифовщик | 4-18 | 4-17;4-19 | | | | | 25% | 45% | |
| 3.16 | электросварщик | 48-1 | 48-2 | | | 18001-43000 | 44544 | 25% | 48% | |
| 3.18 | заточник | 2-11 | 2-2;2-3; 2-17;2-21 | | | | | 25% | 48% | |
| 4 | ИСЦ | | | | | | | | | |
| 4.3 | аккумуляторщик | 1 | 2;5 | 23-45 | 47,1 | | | 25% | 35,43% | |
| 4.5 | слесарь механосбор. работ | 1 | 7;...;10 | | | | | 26-50% | 47,83% | |
| 5 | ЗСЦ | | | | | | | | | |
| 5.7 | электросварщик | 90-1 | 90-7 | | | 18001-43000 | 49680 | >50% | 37,50% | |
| 5.10 | маляр | 100-1 | 100-3;100-4 | | | 18001-43000 | 58760 | >50% | 51,50% | |

Продолжение Таблицы 1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------|---|------------|--|-------|------|-------------|--------|--------|--------|
| 5.11 | резчик | 8-1;3 | | | | 18001-43000 | 72000 | | |
| 5.12 | коваль ручнойковки | 301-3 | 301-4 | | | 18001-43000 | 69600 | | |
| 5.13 | коваль-штамповщик | 301-1 | 301-2 | 23-45 | 72,2 | | | | |
| 6 | ТРЦ | | | | | | | | |
| 6.1 | электрогазосварщик | | | | | 18001-43000 | 24000 | 25% | 41,60% |
| 6.2 | электросварщик | 1-34 | 1-32;1-33 | | | 18001-43000 | 25500 | 25% | 39,50% |
| 6.7 | маляр | 1-5.1 | 1-5.2;...;5.4; 2-62;2-59; 2-60; 3-5.1;...;5.8 | | | 18001-43000 | 49800 | 30-50% | 41,60% |
| 6.8 | чистильщик металла | Пр3-15 | | | | 43001-97000 | 125400 | | |
| 6.11 | Электросварщик на авто-мат. та полуавтомат. машинах | 4-15к-19к | | | | 18001-43000 | 24000 | 25% | 38,50% |
| 6.12 | заточник | 4-19к-20-к | | | | 43001-97000 | 105300 | | |

Оценка тяжести труда может быть проведена на основе оценки реакций и изменений в организме человека, т.е. в основе лежит его функциональное состояние. Выделяют три таких состояния человека: нормальное, предельное (промежуточное состояние между нормой и патологией) и патологическое, которые можно распознавать с помощью медико-физиологических и технико-экономических показателей.

Методика оценки тяжести труда устанавливает зависимость между условиями труда и интегральной реакцией организма человека. Она учитывает санитарно-гигиенические и психофизиологические требования к условиям труда. Первые включают наличие в рабочей зоне превышенных нормативных показателей параметров микроклимата (температуры, влажности и скорости движения воздуха, токсичных веществ, пыли, вибрации, шума, ультразвука, теплового излучения, электромагнитных полей, биологических факторов). А ко вторым относятся: физическая, динамическая и статическая нагрузка; рабочая поза работника и его перемещения в рабочей зоне; изменчивость или продолжительность непрерывной работы за сутки; точность зрительных работ; число заданных объектов наблюдения; темп и монотонность работы; объем получаемой и перерабатываемой информации; режим труда и отдыха; нервно-эмоциональная и интеллектуальная нагрузка.

При оценке тяжести труда учитываются только те элементы условий труда, которые реально воздействуют на работника на конкретном рабочем месте. Категория тяжести труда (всего их установлено шесть [6 – 10]) рассчитывается на основе интегральной оценки биологически значимых факторов производственных условий. Под биологически значимыми понимают такие факторы труда, которые с наибольшей вероятностью влияют на формирование определенных реакций (нормальных, предельных, патологических) организма работника. При этом каждый элемент критериев получает количественную оценку в баллах от 1 до 6. При одновременном воздействии нескольких факторов интегральная оценка тяжести труда в баллах определяется по [11]:

$$U_T = \left[X_{\max} + \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n-1} \cdot \frac{6 - X_{\max}}{6} \right] \cdot 10, \quad (1)$$

где U_T – интегральный показатель категории тяжести в баллах;

X_{\max} – элемент условий труда на рабочем месте, имеющий наибольший балл;

$\sum_{i=1}^n X_i$ – сумма количественной оценки в баллах значимых элементов условий труда без X_{\max} ;

n – количество элементов условий труда;

10 – число, введенное для удобства расчетов.

В соответствии с величиной интегрального показателя условиям труда, выполняемых работ, присваивается та или иная категория тяжести (табл. 2)

Таблица 2

Зависимость категории тяжести труда от интегральной оценки условий труда [11]

| Категория тяжести труда | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Интегральная оценка элементов условий труда, U_T , баллы | до 18 | 18,1-33 | 33,1-45 | 45,1-53 | 53,1-59 | 59,1-60 |

Категория тяжести труда указывает на степень неблагоприятного воздействия данного вида трудовой деятельности на организм человека, и, соответственно на снижение его работоспособности. Исходя из категории тяжести даются экономические рекомендации по дифференциации оплаты в соответствии с условиями труда, размерам компенсаций. Характеристика существующих при этом вредных и опасных производственных факторов позволяет разрабатывать мероприятия по их устранению и оздоровлению условий труда.

Выводы

Выполненные исследования позволили установить, что весь комплекс факторов, воздействующих на формирование условий труда, объединен многообразными взаимными связями и влияет на тяжесть труда человека и его здоровье. Это позволяет проводить оценку условий труда, выявлять наиболее ОПФ, а также рабочие места, на которых необходимо более детально оценить влияние тяжести физического труда по нагрузке, приходящейся на мышцы человека, в процессе трудовой деятельности и разработать мероприятия по устранению выявленных отклонений.

Список литературы

1. Основы безопасности труда. Конспект лекций. Режим доступа: <http://oxpana-trud.ru/osnovy-bezopasnosti-truda.html>
2. Охрана труда в горной промышленности. Раздел: Экспертиза промышленной безопасности. Режим доступа: <http://dnop.kiev.ua/category/ekspertiza-promyshlennoj-bezopasnosti/>
3. Воронова В.М., Егель А.Э. Определение категории тяжести труда. Оренбург: ГОУ ОГУ. 2004. – 18 с.
4. Дегтяренко Г.Є. Стан виробничого травматизму в зв'язку з психофізіологічною невідповідністю працівників. Інформ. бюлетень з охорони праці. К.: ННДІОП. 2004. – №1. С. – 12 – 13.

5. Безопасность труда в приборо- и радиоаппаратостроении: Учеб. пособие / В.И. Козаченко, Т.В., Колобашкина, В.П. Котов, С.В. Михаленков, Б.И. Попов, В.И. Турубаров // СПбГУАП. СПб., – 2005. – 92 с.: ил.
6. Гигиена труда в основных отраслях промышленности: Метод. пос. / Т.В. Еремина, И.Г. Тимофеева, Н.И. Гусева. // Улан-Удэ. Изд-во ВСГТУ. – 2004.
7. Єфремова О.С. Охорона праці від А до Я. М. 2007. – С. 27 – 31.
8. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. Технологическое предвидение. К.: Політехніка. 2005. – 156 с.
9. Nikolay Kasyanov, Alexandra Andrianova, Victor Medyanik. Research of anthropometrical peculiarities of population in Ukraine // ТЕКА Com. Mot. Energ. Roln. Lublin, 2010. Vol. ХА. – Р. 223 – 227.
10. Эргономика: Учеб. пособие для вузов/ Под общ. ред. В.В. Адамчука. М.: ЮНИТИ. ДАНА. – 1999. – 254 с.
11. Безопасность жизнедеятельности: Учебник для вузов / Под общ. ред. С.В. Белова. 2-е изд., испр. и доп. М.: Высш. шк. 1999. – 448 с.

MODERN CONDITIONS AT THE MECHANICAL ENGINEERING ENTERPRISES

Deyneka I.G., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: bgd.ot.dahl@yandex.ru

Salo V.I., C.Sc. (Engineering), Associate professor, e – mail: bgd.ot.dahl@yandex.ru

Pronina Y.G., (Engineering), assistant, e – mail: pjg82@mail.ru

Lugansk national university of a name of Vladimir Dahl, Molodezhny quarter, 20-a, Lugansk, 91034, Luhansk People's Republic

Abstract

The levels of occupational accidents and diseases are the major indicators of the state of labour protection on production in the region, the state and every sphere of economic activity. In recent years, against the background of increasing technical equipment of production and improvement of environmental conditions more clearly is the necessity of considering the influence of tension of physiological functions in the labor process, as one of the important factors that determines the performance and health of a person. Over-voltage individual organs and systems adversely affect the condition of the human body and reduce the efficiency of labor, so the physical component is still a significant share of the machinery industry. Therefore, there is a need to study combined effects of the psychophysiological state of the human operator and his safety in the course of employment.

Keywords: labor protection, injuries, conditions, and category of severity of work, harmful and dangerous production factors, mechanical engineering.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ УЧЕТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОДУКЦИИ

*МАРКОВА М. И., канд. техн. наук, доцент
(АлтГТУ, г. Барнаул, Россия)*

Маркова М.И. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова»,
е – mail: margarita-markova@inbox.ru

Аннотация

В статье приведена методика автоматизированного учета изготовления продукции, которая реализована в виде программного модуля "Производство". Модуль позволяет вести планирование производственного процесса. Для этого вся информация по изделиям заносится и хранится в связанных между собой базах данных. Разработан алгоритм построения входимости по изделию или узлу. Детали, которые запускаются в производство, согласно календарного плана, проходят все стадии обработки и отслеживаются на этапе межцехового движения деталей. Обработанные детали отправляются на склад готовых деталей, где хранится информация по количеству деталей, готовых отправить на сборку узлов. Планирование этапа сборки изделия ведется построением производственного графика, где определяется дефицит деталей или узлов по изделию. Детали, не прошедшие обработку находятся в незавершенном производстве. Разработка сменного задания по цехам ведется с учетом незавершенного производства.

Ключевые слова: планирование производственного процесса, автоматизированный учет изготовления продукции, склад готовых деталей, незавершенное производство, межцеховое движение деталей.

Введение

Результативность работы промышленного предприятия зависит от уровня организации производственных и управленческих процессов. Планирование производственного процесса – основа своевременного выпуска изделий [1]. Производственный процесс включает в себя основные – технологические процессы, в ходе которых меняется форма, размеры и физико-химические свойства продукции; вспомогательные процессы, которые обеспечивают бесперебойное протекание основных процессов (изготовление и ремонт инструмента, оснастки, ремонт оборудования, обеспечение всеми видами энергии) и обслуживающие процессы (транспортировка, хранение, технологический контроль и др.). Слаженная работа всех этих процессов приводит к положительным результатам работы предприятия. Самым трудоемким процессом в управлении и планировании является технологический процесс. В машиностроении он в основном делится на три стадии: заготовительную, обрабатывающую и сборочную.

Трудоемкость планирования стадий процесса зависит от типа производства и во многом предопределяется оперативным планированием, которое в основном сводится к выработке сменного задания на изготовление изделий, с учетом производственных возможностей цеха, участка и отдельного оборудования.

Основная трудоемкость планирования в единичном и мелкосерийном производстве заключается в выполнении каждого заказа из многочисленных позиций плана в назначенный срок и полной равномерной загрузкой рабочих и оборудования. При разработке сменного задания в единичном и мелкосерийном производстве необходимо:

- охватить всю номенклатуру продукции, подлежащей изготовлению в данный промежуток времени согласно календарного графика и с учетом незавершенного производства;
- отобрать заказы для данной смены;

- определить трудоемкость различных видов работ;
- сопоставить объем работ различных видов с производственными возможностями технологического оборудования;
- определить материальную обеспеченность задания;
- распределить выполнение работ между технологическим оборудованием с максимальной загрузкой оборудования и работающих.

Менее трудоемким является планирование в серийном производстве, когда номенклатура изделий устойчива. Оперативное планирование здесь сводится к планомерному обеспечению сборки комплектующими изделия (детальями, сборочными единицами, полуфабрикатами). Планирование работ ведется в соответствии с потребностями склада готовых деталей.

В массовом же производстве оперативное планирование сводится к закреплению за каждым рабочим местом выполнения одной операции технологического процесса изготовления изделия одного наименования. Планом производства устанавливается количество изделий, которое производится в течение смены.

Методика автоматизированного учета изготовления продукции

Предприятия Алтайского края сейчас в основном занимаются выпуском единичной, мелкосерийной и серийной продукции. Автоматизированный учет стадий прохождения продукции при ее изготовлении позволит сократить трудоемкость планирования производственного процесса [2].

Разработан программный модуль "Производство" для автоматизированного учета изготовления продукции, который реализован в среде FoxPro. Информация по деталям, узлам и изделиям хранится в связанных между собой базах данных. Работа в системе автоматизированного учета ведется в диалоговом режиме. Разработан алгоритм построения входимости изделия либо узла, который облегчает работу на этапе межцехового движения деталей, незавершенного производства и склада готовых деталей.

На этапе межцехового движения деталей ведется учет деталей запущенных в производство (рис. 1).

| Код | Деталь (узел) | Цеха |
|--------------|---------------|--------|
| 150.01.011 | ВАЛ-ШЕСТЕРНЯ | МУ |
| 150.01.012 | МАХОВИК | |
| 150.01.013 | КРЫШКА | |
| 150.01.014 | ПРОКЛАДКА | |
| 150.01.015 | ШЕСТЕРНЯ | МУ |
| 150.01.016 | ПРОКЛАДКА | |
| 150.01.017 | КРЫШКА | |
| 150.01.018 | ПРОКЛАДКА | ЗСУ МУ |
| 150.01.020 | ВОДИЛО | |
| 150.01.031-2 | ФЛАНЕЦ | |
| 150.01.032-2 | СТАКАН | |
| 150.01.033 | ШТИФТ | |
| 150.01.034 | ПОВОДОК | |
| 150.01.035 | СТАКАН | |

Поиск по: F1-коду; F4-наим-ю; F5-продолжить; Home-просмотр; INS-Анотация; F2-Внести деталь в цех; F3-Перем-ть дет. по цехам; F11-Выборка по дате; F6-Детали по цехам; F7-Маршрут деталей по цехам. Движение заг-к по цеху; F9-на выбранное изделие; F8-на все изделия; F12-Остатки; F10-выход.

Рис. 1. Детали в производстве

Поступая на заготовительно-сборочный участок деталь проходит весь маршрут обработки, при этом фиксируется дата поступления и количество деталей в цехе (рис. 2).

| Цех | Кол-во | Дата пост. | Заготовка | Откуда(цех) | Откуда(дата) |
|-----|--------|------------|-----------|-------------|--------------|
| ЗСУ | 2.000 | 25.02.17 | 135*520 | | |
| МУ | 3.000 | 27.02.17 | 135*520 | ЗСУ | 25.02.17 |

F3-Переместить деталь по цехам; F2-Отправить сборку на СГД;
 F4-Отправить штуки на СГД; F6-Отправить в брак; F10-Выход.

Рис. 2. Движение детали по цехам

В режиме реального времени можно получать информацию по деталям каждого изделия запущенного в производство. В выходном документе на детали, находящиеся в производстве указывается количество и маршрут прохождения с датой поступления в цех; марка и сортament заготовки; норма расхода материала. Расход материала за определенный период времени по всем изделиям, либо по каждому изделию в отдельности можно контролировать по сводной ведомости расхода материала (рис. 3).

| | | | |
|---------------------------------|--------------|----|---------|
| УЗЕЛ: 49.02.03.000 | | | |
| СТ 45 | КРУГ 24 | кг | 2.700 |
| И Т О Г О : | | | 2.700 |
| ИЗДЕЛИЕ: 1200МРК БУРОВОЙ СТАНОК | | | |
| УЗЕЛ: СБ 550МРК | | | |
| ЛИТЬЕ | ЧУГУННОЕ | кг | 49.000 |
| СТ 20 | КРУГ 70 | кг | 0.600 |
| СТ 3 | ЛИСТ= 5 | кг | 0.960 |
| СТ 3 | ЛИСТ= 8 | кг | 13.360 |
| СТ 3 | ШВЕЛЛЕР N 16 | кг | 35.700 |
| СТ 35 | КРУГ 90 | кг | 11.850 |
| СТ 35 | ТР 89*14 | кг | 115.320 |
| СТ 38X2МЮА | КРУГ 150 | кг | 237.000 |
| СТ 38X2МЮА | КРУГ 180 | кг | 57.100 |
| СТ 40 | КРУГ 100 | кг | 53.400 |
| СТ 45 | КРУГ 80 | кг | 12.700 |
| СТ 45 | КРУГ 180 | кг | 98.800 |

Рис. 3. Сводная ведомость по расходу материала

Детали, не прошедшие весь маршрут обработки находятся в незавершенном производстве. По каждому цеху и операциям их можно отследить (рис. 4). При этом сменное задание по цехам разрабатывается с учетом незавершенного производства.

| Код | Узел | Цех | Операция | Кол-во |
|----------------|------------|-----------------|-----------------|--------|
| 150.01.002 | КРЫШКА | МЕХАНИЧЕСКИЙ 1 | НАЛАДКА | 0 |
| | | ТЕРМОГАЛЬВАНИЧЕ | ЗАКАЛКА | 5 |
| | | ТЕРМОГАЛЬВАНИЧЕ | ОТПУСК | 5 |
| | | ТЕРМОГАЛЬВАНИЧЕ | ПРОБЕКТРУЙНАЯ | 5 |
| | | ТЕРМОГАЛЬВАНИЧЕ | АЗОТАЦИЯ | 5 |
| 150.01.003 | ЦЕНТРАТОР | МЕХАНИЧЕСКИЙ 1 | ТОКАРНАЯ ЧЕРНОВ | 0 |
| | | МЕХАНИЧЕСКИЙ 1 | СВЕРЛИЛЬНАЯ | 0 |
| | | МЕХАНИЧЕСКИЙ 1 | СЛЕСАРНАЯ | 0 |
| | | МЕХАНИЧЕСКИЙ 1 | ТОКАРНАЯ ЧИСТОВ | 0 |
| | | ЗАГОТОВИТЕЛЬНОС | РЕЗАТЬ | 3 |
| | | КУЗНЕЧНО-ПРЕССО | РУБИТЬ-КТС | 3 |
| | | КУЗНЕЧНО-ПРЕССО | КОВАТЬ | 3 |
| | | МЕХАНИЧЕСКИЙ 1 | ФРЕЗЕРНАЯ | 3 |
| | | МЕХАНИЧЕСКИЙ 1 | СЛЕСАРНАЯ | 3 |
| | | МЕХАНИЧЕСКИЙ 1 | СВЕРЛИЛЬНАЯ | 0 |
| МЕХАНИЧЕСКИЙ 1 | ТОКАРНАЯ I | 0 | | |

Рис. 4. Детали в незавершенном производстве

Кроме того ведется расчет стоимости работ по каждому цеху за определенный период времени или на каждую деталь, находящуюся в незавершенном производстве, по операциям цеха (рис. 5).

| Цех | Операция | Партия | Стоимость |
|----------------------------|---------------|--------|-----------|
| 150.01.001 -ШЕСТЕРНЯ | | | |
| - 1шт | | | |
| ***** | | | |
| ЗАГОТОВИТЕЛЬНОСБОРОЧНЫЙ | РЕЗАТЬ | 5 | 142-74.0 |
| ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ | ДОЛБЕЖНАЯ | 5 | 748-81.8 |
| КУЗНЕЧНО-ПРЕССОВЫЙ УЧАСТОК | РУБИТЬ-КТС | 5 | 89-73.9 |
| КУЗНЕЧНО-ПРЕССОВЫЙ УЧАСТОК | КОВАТЬ | 5 | 443-71.3 |
| МЕХАНИЧЕСКИЙ 1 | ТОКАРНАЯ | 5 | 2240-58.2 |
| ТЕРМОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ | ЗАКАЛКА | 5 | 113-75.5 |
| ТЕРМОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ | ОТПУСК | 5 | 118-83.4 |
| ТЕРМОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ | ПРОБЕСТРУЙНАЯ | 5 | 14-66.3 |
| ТЕРМОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ | АЗОТАЦИЯ | 5 | 716-28.9 |
| И Т О Г О : | | | 4629-13.3 |
| 150.01.003 -ЦЕНТРАТОР | | | |
| - 1шт | | | |
| ***** | | | |
| ЗАГОТОВИТЕЛЬНОСБОРОЧНЫЙ | РЕЗАТЬ | 3 | 71-59.8 |
| КУЗНЕЧНО-ПРЕССОВЫЙ УЧАСТОК | РУБИТЬ-КТС | 3 | 15-48.0 |

Рис. 5. Стоимость работ по цехам

Детали, прошедшие все стадии обработки, поступают на склад готовых деталей, где хранит информацию по количеству деталей, готовых отправиться на сборку узла, изделия или на сбыт, если деталь является запчастью. Наполнение склада готовых деталей можно контролировать по датам (рис. 6).

| Поступление деталей на склад СГД за ноябрь 2016 г. | | | |
|--|------------------------|--------|---------------|
| Код | Наименование | Кол-во | Дата поступл. |
| 0-16-1 | ШАЙБА УСТАНОВОЧНАЯ | 3 | 20.11.16 |
| 0-17-1 | БОЛТ | 12 | 17.11.16 |
| 0-21А | МУФТА | 7 | 20.11.16 |
| 0-59 | СТЯЖКА | 5 | 20.11.16 |
| 0-61 | СТЯЖКА | 3 | 18.11.16 |
| 0.001 | БОЛТ | 39 | 19.11.16 |
| 0.002 | ШАЙБА | 4 | 23.11.16 |
| 0.019-1 | КОЛЬЦО | 176 | 19.11.16 |
| 0М-100-1 | ШИТОК | 4 | 24.11.16 |
| 0М-101 | ПРОКЛАДКА (НАБОР 3шт.) | 91 | 19.11.16 |
| 0М-111-1 | КОЖУХ МУФТЫ | 2 | 24.11.16 |
| 0М-127-1 | ФЛАНЕЦ | 6 | 18.11.16 |
| 0М-132-2 | ВТУЛКА | 16 | 23.11.16 |
| 0М-142-1 | ВТУЛКА | 39 | 18.11.16 |

Рис. 6. Поступление деталей на склад готовых деталей

Планирование этапа сборки изделия ведется построением производственного графика с учетом потребностей склада. При этом система определит и выведет дефицит деталей или узлов по изделию. Это позволит сформировать задание на выполнение работ по цехам (рис. 7).

| ЗАДАНИЕ ДЛЯ ЦЕХА ЗСЦ ДЕФИЦИТ ЗАГОТОВОК ПО ИЗДЕЛИЮ: 150.00.000 -150.00.000 МЕХ-ЗМ СВИЧИВАНИЯ | | | | | | | | | |
|---|--------------|--------|-----------|------------------|-------|-----|---------|---------|---------|
| Код | Наименование | Марка | Сортамент | Размер заготовки | Пл ан | СГД | Деф иц. | Заготов | |
| | | | | | | | | М1 | ЗСЦ КП |
| 150.01.007 | МАХОВИК | СТ 45 | КРУГ 130 | L=200 | 2 | 1 | -1 | | |
| 150.01.001 | ШЕСТЕРНЯ | СТ 40Х | КРУГ 180 | L=330 | 2 | | -7 | 9 | |

Рис. 7. Задание для цеха

Результаты и обсуждение

Программный модуль "Производство" автоматизированного учета изготовления продукции реализован в среде FoxPro. Структура индексированных баз данных для хранения информации позволяет при работе с базами максимально наполнять выходные документы производственными данными. Входимость изделия либо узла строится на основе алгоритма перебора деталей и узлов из общей базы данных по узлам. Работа модуля организована в три этапа. Контроль деталей, запущенных в производство осуществляется межцеховым движением деталей. По мере их изготовления идет наполнение склада готовых деталей. Детали, не прошедшие все стадии обработки, находятся в незавершенном производстве. Составление сменного задания ведется с учетом деталей, находящихся в незавершенном производстве. Планирование сборочных работ по узлам и изделиям ведется с учетом потребностей склада.

Выводы

Предложенная методика автоматизированного учета изготовления продукции предназначена для промышленных предприятий, выпускающих продукцию с достаточно большим количеством входящих узлов и деталей. Разработанный программный модуль облегчает трудоемкость контроля процесса изготовления продукции. При этом участвует в планировании производственного процесса, так как позволяет составлять сменные задания по цехам с учетом деталей, находящихся в незавершенном производстве и строить производственные графики на изделие с учетом потребностей склада готовых деталей.

Список литературы

1. Марков А.М., Маркова М.И., Дронова О.Б. Управление технологической подготовкой механической обработки. Актуальные проблемы в машиностроении. 2016. № 3. 511 – 516 с.
2. Маркова М.И. Автоматизация технологической подготовки производства. Инновации в машиностроении-основа технического развития России 2014: сборник трудов VI Международной научно-практической конференции. 268 – 272 с.

**AUTOMATED MANAGEMENT OF ACCOUNTING
MANUFACTURING PRODUCTION**

Markova M. I. Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e – mail: margarita-markova@inbox.ru

FSAEI HE Polzunov Altai State Technical University, 656038, Russian Federation, Altai region, Barnaul, Lenina avenue, 46

Abstract

The article describes the technique of automated accounting of production. It implemented as a software module. The module allows planning the production process. To do this, all the information on the finished products, spare parts, kits and etc. entered and stored in linked databases. Created the algorithm for determining which elements, components, assemblies is part of finished products and each other. Details that were put into production, according to schedule, pass all stages of processing and are tracked on the stage interplant movement of parts. Machined parts are sent to the warehouse of finished parts, which stores information on the number of items, ready to go to Assembly sites. The planning stage of assembling products is building a production schedule. It allows determined of a shortage of parts or assemblies in the product. Parts not processed are unfinished productions (work in process or WIP). Development of replacement jobs through the shops is tailored to the WIP.

Keywords: planning of the production process, automated management of accounting manufacturing production, warehouse finished parts, work in progress (WIP), intershop movement of parts.

УДК 658.5.011

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ИМПОРТОЗА
МЕЩАЮЩЕЙ ПРОДУКЦИИ НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ
ПРЕДПРИЯТИЯХ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

*ДУБОВ Г. М., канд. техн. наук, доцент,
ШИРОКОЛОБОВА А. Г., канд. филолог. наук, доцент,
АШИХМИН В. Е., магистрант,
ВИНИДИКТОВ А. В., магистрант
(КузГТУ, г. Кемерово, Россия)*

Дубов Г.М. – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28,
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
е – mail: nikokem@mail.ru

Аннотация

Рассматриваются вопросы, связанные с возможностью организации производства новой импортозамещающей продукции на машиностроительных предприятиях Кемеровской области. Приводятся сведения об ориентированности Кузбасского машиностроения на основную, бюджетоформирующую отрасль региона. Утверждается, что увеличение доли производства инновационной машиностроительной продукции в регионе, возможно только при условии формирования дееспособной инфраструктуры по внедрению инноваций в промышленное производство и попытке сообща находить пути решения актуальных проблем машиностроительной отрасли: от подготовки кадров до кооперации и координации в продвижении интересов предприятий на внутреннем и внешнем рынках. Отражены причины тотального вытеснения с рынка отечественных производителей горношахтного оборудования. Утверждается, что качественная и эффективная реализация программы импортозамещения, в области горного машиностроения, невозможна без создания единой базы данных отражающей сегодняшние потенциальные возможности региональных машиностроительных предприятий их производственные и кадровые ресурсы. Рассматриваются вопросы, связанные с некоторыми трудностями при подготовке и актуализации таковой базы данных по региональным машиностроительным предприятиям.

Ключевые слова: машиностроение, горношахтное оборудование, импортозамещение, база данных, кооперация, производство.

Введение

Как известно машиностроение в целом традиционно выступает в качестве вспомогательной или «подсобной» отрасли по отношению к другим отраслям. Кузбасское машиностроение в силу ряда объективных и субъективных обстоятельств в большей своей части обслуживает рынок полезных ископаемых. И предпосылкой того, что положение дел может резко поменяться, на сегодня не просматривается. По крайней мере, до тех пор, пока добыча угля и его переработка доминирует в экономике Кемеровской области. «Вспомогательный» статус вместе с тем подразумевает опережающее развитие машиностроения по отношению к тем отраслям, которые служат местом приложения продукции его деятельности. Фактически машиностроение создает ту техническую базу, что определяет перспективы развития нескольких отраслей промышленности.

Анализ приведенных на сегодняшний день в открытых источниках данных не дает возможности ответить на вопросы, какие потенциальные технологические возможности имеют региональные машиностроительные предприятия, какой имеется на вооружении станочный парк и в каком он состоянии.

Какова квалификация рабочих и инженеров, какие резервы мощностей имеют предприятия.

Ответы на данные вопросы затруднены тем, что в настоящее время не существует актуальной базы данных, отражающей соответствующие сведения по машиностроительным предприятиям Кемеровской области. Отсутствие такой базы данных создает некоторые трудности при планировании и организации импортозамещающего производства любой новой продукции или увеличении объемов выпуска уже выпускаемой продукции. Кроме того, такая база данных была бы полезна, в том числе для оценки и мониторинга кадрового, ресурсного, энергетического обеспечения предприятий машиностроительного комплекса Кузбасса, планирования эффективного использования производственных мощностей, установления связей между партнерами в вопросах организации совместного производства.

Теория

С началом рыночных преобразований в начале 90-х годов прошлого века машиностроение, как и многие другие отрасли, оказалась в трудной ситуации. Заговорили и продолжают говорить о хроническом кризисе производства в Кузбассе, в какой-то мере обусловленном объективными причинами. Значительная часть Кузбасского машиностроения работала по внешним заказам, в частности, производители горно-шахтного оборудования 60 – 70% своей продукции вывозили за пределы Кемеровской области. Ещё около четверти всей машиностроительной продукции приходилось на военные заказы. Сейчас из предприятий ВПК в отрасли остался только АО «Кемеровский механический завод», выпускающий боеприпасы [1].

Такое положение дел в машиностроительной отрасли Кузбасса обусловлено тем, что, в условиях рыночной экономики, все предприятия вынуждены были пойти по пути самостоятельного поиска наиболее выгодных контрактов и определения оптимальной номенклатуры выпускаемой продукции, обеспечивая при этом максимально возможную собственную прибыль. Этот подход поспособствовал уничтожению горизонтальных связей между машиностроительными предприятиями, что, в свою очередь, послужило дальнейшим препятствием в последующей кооперации предприятий и реализации совместных проектов.

В последние годы, несмотря на некоторое ежегодное увеличение объемов выпуска продукции региональными машиностроительными предприятиями, удельный вес инновационной продукции в общем объеме производства кузбасского машиностроения, остается достаточно низким. Чтобы увеличивать долю производства инновационной машиностроительной продукции в регионе, прежде всего необходимо сформировать дееспособную инфраструктуру внедрения инноваций в промышленное производство и попытаться сообща находить пути решения актуальных проблем машиностроительной отрасли: от подготовки кадров до кооперации и координации в продвижении интересов предприятий на внутреннем и внешнем рынках.

На сегодняшний день, очевидно, что темпы роста машиностроения в регионе полностью зависят от угледобывающей отрасли. Сегодня региональные производители ежегодно обеспечивают лишь частично заказ угольных компаний Кузбасса от общего спроса. Модернизация и переоснащение шахт в большинстве своем осуществляется за счет ввоза импортной техники. Таким образом, одной из основных проблем для дальнейшего развития машиностроительного комплекса Кузбасса является вывоз капитала [1].

Рассматривая этот вопрос в разрезе горного машиностроения, можно с уверенностью констатировать, что данные по количественной оценке закупленного за последние годы горношахтного оборудования импортного производства, говорят о необходимости и целесообразности развития регионального машиностроения и сопутствующих инженеринговых услуг в области проектирования современного горно-шахтного оборудования используемого при добыче и переработке угля [2].

Кемеровская область обеспечивает более половины добычи угля в России. При этом за последние десятилетия произошло замещение изношенной горной техники, изготовленной еще в позднесоветский период, на современную технику зарубежного производства.

Одной из основных причин вытеснения отечественного производителя с рынка горного машиностроения стало то, что его зарубежные конкуренты смогли предложить индивидуальное решение для самых различных условий ведения горных работ. Были предложены возможности гибкого изменения номенклатурного ряда производимой техники и подбор таких сочетаний технологических параметров, которые удовлетворяли потребности конкретного потребителя [3].

В настоящее время, когда остро стоит вопрос об импортозамещении, только кооперация и реализация совместных проектов позволит выпускать конкурентоспособную продукцию. Но, для реально работающей кооперации предприятий необходимо знать, какую продукцию, в каких объемах, и в какие сроки может выпускать то или иное предприятие – потенциальный партнер. Какими производственными и кадровыми ресурсами оно обладает.

Результаты и обсуждения

Все вышеперечисленное дает основания считать, что создание единой базы данных о возможностях машиностроительных предприятиях Кемеровской области, перспективах их дальнейшего развития является одной из первейших задач, решение которой позволит качественно и эффективно реализовать программу импортозамещения в области горного машиностроения.

При проектировании такой базы данных необходимо ответить на следующие, основные вопросы:

1. Какие сведения о предприятии являются наиболее важными, а какие - второстепенны.
2. Каким образом обеспечить постоянную актуализацию, и истинность сведений, содержащихся в базе данных.
3. Кто, и на каких условиях будет иметь доступ к данной базе.

Для ответа на первый вопрос целесообразно использовать схему, приведенную на рис. 1, отражающую, какие составляющие входят в понятие производственный потенциал предприятия. Принимая представленную схему за основу, необходимо дополнить её понятием «степень использования» той или иной составляющей, для того, чтобы можно было оценить способность предприятия к увеличению объемов производства, изменению номенклатуры выпускаемой продукции, проведению НИиОКТР [4].



Рис. 1. Состав производственного потенциала предприятия

Второй вопрос может быть разрешен только при заинтересованности руководства или собственника предприятия в постоянном поиске новых партнеров и возможностей для расширения производства и получения максимальной прибыли.

Альтернативой является административное воздействие со стороны государственных органов исполнительной власти (администрация области, города и соответствующие департаменты, входящие в их структуру).

Анализ вебсайтов предприятий говорит о том, что кроме данных об ассортименте выпускаемой продукции никаких других сведений о производственном потенциале предприятий найти невозможно. Это позволяет предположить, что руководство предприятий во избежание обострения конкурентной борьбы незаинтересованно в разглашении сведений о производственном потенциале предприятия. Следовательно, необходимо разработать комплекс мер, позволяющих изменить или нейтрализовать сложившуюся ситуацию.

Полный ответ на вопрос, связанный с условиями доступа к базе данных, в настоящее время невозможен, так как отсутствует ряд необходимых сведений, которые можно будет получить только при детальной проработке первых двух вопросов. Возможно, только указать на то, что свободный доступ к такой базе данных невозможен, так как некоторые сведения о предприятиях, содержащиеся в такой базе являются коммерческой или государственной тайной.

Выводы

Проведенный анализ возможностей организации производства импортозамещающей продукции на машиностроительных предприятиях Кемеровской области уверенно констатирует о необходимости и целесообразности в ближайшей перспективе разработки актуальной базы данных отражающей производственный потенциал региональных предприятий машиностроительного комплекса. Это, в конечном итоге, будет способствовать активному развитию регионального горного машиностроения и сопутствующих инжиниринговых услуг, что в конечном итоге, позволит снизить риски отставания и импортозависимости от зарубежных компаний - мировых лидеров в производстве горношахтного оборудования, а также обеспечить конкурентоспособность и дальнейшую положительную динамику развития регионального горного машиностроения.

Список литературы

1. Дубов Г. М. Роль машиностроения на современном этапе развития промышленности Кузбасса/ Сборник материалов V всероссийской, 58 научно-практической конференции молодых ученых «Россия молодая», 16-19 апреля 2013 г. Изд-во: КузГТУ, - Кемерово 2013. – С. 158 – 160.
2. Трубицина Н.В. Обоснование концептуальных подходов к разработке программы импортозамещения оборудования угольных шахт Кемеровской области. // Трубицина Н.В., Ярош А.С.// Научно-технический журнал «Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности» №1-2014. Изд-во: ООО «ВостЭКО» (Кемерово). С. 6 – 14.
3. Дубов Г. М. Сравнительный анализ оснащенности угольных предприятий горношахтным оборудованием отечественного и импортного производства/ Сборник материалов международной научно-практической конференции «Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении», 18-21 апреля 2017 г. Изд – во: КузГТУ, - Кемерово 2017.
4. Веснин В.Р. Стратегическое управление: - М.: ТК Велби, Изд-во Проспект, 2006.

**ANALYSIS OF OPPORTUNITIES TO PRODUCE NEW
IMPORT – SUBSTITUTING PRODUCTS AT MACHINE – BUILDING ENTERPRISES
OF KEMEROVO REGION**

Dubov G.M. C.Sc. (Engineering), Assistant professor, e – mail: nikokem@mail.ru

Shirokolobova A. G. C.Sc. (Philology), Assistant professor, e – mail: nastja_shirokolo@rambler.ru

Ashikhmin V.E. (Engineering), Graduate student, e – mail: vitaliashikhmin@yandex.ru

Vinidiktov A.V. (Engineering), Graduate student, e – mail: Vinidiktivandrei@gmail.com

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; 28, Vesenniaia St., 650000, Kemerovo, the Russian Federation

Abstract

The paper considers the possibility to organize the production of new import-substituting products at machine-building enterprises in Kemerovo region. It provides information concerning the orientation of Kuzbass machine-building industry to the main, budget-forming sector of the region. It is asserted that production share increase of innovative machine-building products in the region is possible only if the effective infrastructure to introduce industrial production innovations is formed and there is an attempt to solve the urgent problems of the machine-building industry: either personnel training or cooperation and coordination in promoting the enterprises' interests in domestic and foreign markets. The reasons of total displacement from domestic manufacturers market of mining equipment are given. It is confirmed that qualitative and effective implementation of the import substitution program in the field of mining engineering is impossible without unified database creation reflecting today's potential possibilities of regional machine-building enterprises and their production and human resources. The issues related to some difficulties in preparing and updating of such database about regional machine-building enterprises are discussed in the article.

Keywords: machine building, mining equipment, import substitution, database, cooperation, production.

УДК 338

**МЕТОД МАРКЕТИНГОВОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
ИНТЕРНЕТ – РЕСУРСА: А/Б ТЕСТИРОВАНИЕ**

*ЧАХЛОВА К. В. магистрант,
ГРАБКО Е. С., магистрант,
НИЗОВКИНА Н. Г., кандидат экономических наук
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Чахлова К.В. – 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e – mail: christina1310@mail.ru

Аннотация

На сегодняшний день предприятия стараются развиваться в интернет пространстве, так как от этого зависит их успешное функционирование на рынке товаров и услуг. Для того чтобы поддерживать это развитие необходимо привлекать новых клиентов с помощью интернет – рекламы, предоставлять им полезный контент, внедрять новые методики привлечения клиентов, а также анализировать и тщательно следить за метрикой рекламных кампаний, сайтов, страниц в социальных сетях, чтобы замерять эффективность и улучшать ее. Одним из эффективных методов анализа является А/Б тестирование. Использование этого метода позволяет измерять показатели эффективности и совершенствовать веб – ресурсы.

Ключевые слова: А/Б тестирование, эффективность, интернет-маркетинг, конверсия, веб – ресурс.

А/Б тестирование – это маркетинговый метод повышения эффективности интернет ресурсов. Данное тестирование позволяет узнать какие изменения на сайте или в рекламных объявлениях влияют на действия клиентов (переход, покупка, регистрация и т. д) [1, 52].

В основном А/Б тестирование применяют для оценки сайтов. С помощью данного метода можно узнать, как внедряемые изменения на веб – страницах влияют на показатель конверсии. При проведении данного метода тестируют два варианта страниц сайта (вариант А и вариант Б) разделяя трафик на равные части и направляют на тестируемые страницы. По итогам тестирования производится сбор информации по посещаемости Интернет страниц, оценка результатов.

Для тестирования, необходимо определить, какие элементы веб – страницы будут подвержены доработке. Чаще всего элементами тестирования сайтов являются:

- дизайн веб – страниц;
- тексты, заголовки;
- отзывы;
- формы для отправок заявок, регистраций;
- контент;
- расположение конверсионных кнопок и их внешний вид.

Можно выделить следующие этапы проведения А/Б тестирования:

1. Анализ веб – страниц. Для этого нужно оценить трафик посещаемой веб – страницы и выявить ее недостатки, чтобы произвести изменения;
2. Внедрение изменений на одну из вариантов веб – страниц;
3. Создание А/Б тестирования. Для проведения теста лучше всего воспользоваться специализированными сервисами.

4. Анализ полученных результатов. Необходимо сравнить конверсии, если на веб – странице с внесенными изменениями коэффициент конверсии выше, значит, внедряемые изменения увеличили эффективность веб – ресурса.

При проведении А/Б тестирования маркетологи используют специализированные сервисы, так как с их помощью можно поставить цели и задачи, а также отслеживать весь процесс тестирования. Наиболее распространенные сервисы: Realroi, ABtest, Changeagain, Content Experiment.

В качестве примера А/Б тестирование было проведено авторами данной статьи для одностраничного сайта на проект «Как получать по 189 заявок на свои услуги ежедневно?» для интернет – маркетолога Аносова Сергея.

Для проведения теста было подготовлено два сайта. На каждый из них направлено по 100 целевых посетителей, стоимость одного посетителя 5,35 рублей. По итогам на сайте А было оставлено 8 заявок, на сайте Б была оставлена 21 заявка. Соответственно на сайте А конверсия 8 %, а стоимость заявки составила 66 рублей. На сайте Б конверсия 21 %, стоимость заявки 25 рублей. Как мы видим сайт Б в 2,6 раза более эффективно генерирует заявки и помогает получать гораздо более дешевые заявки и экономит рекламный бюджет.

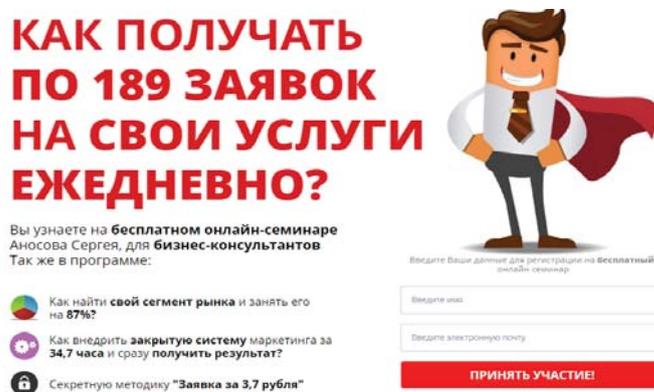


Рис. 1. Одностраничный сайт (Вариант А)

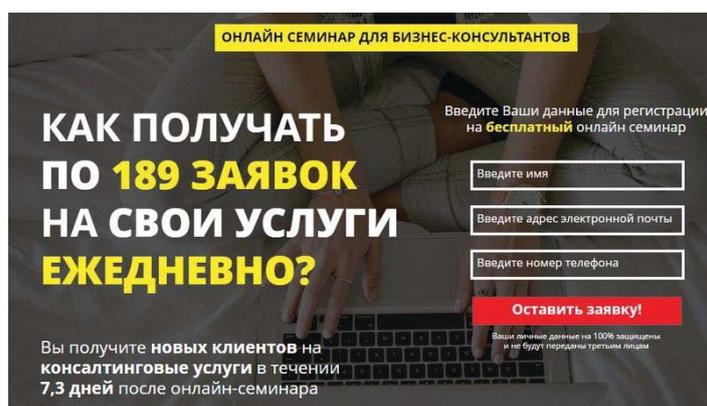


Рис. 2. Одностраничный сайт (Вариант Б)

Как мы видим сайт Б в 2,6 раза более эффективно генерирует заявки и существенно экономит рекламный бюджет.

А/Б тестирование помогает оценить эффективность внедряемых изменений и совершенствовать интернет ресурсы для того чтобы получать от сайта максимальные результаты с минимальными затратами.

Список литературы

1. Данченко Л. А., Дейнекин Т. В. Понятие и значение комплексного интернет – маркетинга в деятельности предприятий // Маркетинг в России и за рубежом. 2014. № 1. С. 109 – 118

METHOD OF MARKETING RESEARCH ONLINE RESOURCE: A/B TESTING

Grabko E.S., master-student, e – mail: evgeny.grabko@gmail.com

Chahlova Ch.V., master-student, e – mail: christina1310@mail.ru

Nizovkina N.G.. PhD in economics, e – mail: nizovkina@corp.nstu.ru

Novosibirsk state technical University, Karla Marksa str. 20, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

Nowadays, businesses are trying to develop in the Internet space, because on this depends their successful operation in the market of goods and services. In order to support this development, it is necessary to attract new customers through online advertising, provide them with useful content, introduce new techniques for attracting customers, and analyze and closely monitor the metrics of advertising campaigns, web-sites, pages on social networks, to measure efficiency and improve it. One of the most effective methods of analysis is A / B testing. Using this method allows to measure performance metrics and improve web resources.

Keywords: A/B testing, effective, internet-marketing, metric, web – resource.

УДК 331.445

ПЕРСПЕКТИВЫ МОТИВАЦИИ РАБОТНИКОВ РОССИЙСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ КРИЗИСА

*НАУМОВА Ю. Н., магистрант,
СТАРОДУБЦЕВА В. К., канд. эконом. наук, доцент
(НГТУ, г. Новосибирск, Россия)*

Наумова Ю.Н. – 630073, г. Новосибирск, пр. К – Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e – mail: *naumova.yulyasha@yandex.ru*

Аннотация

В статье описана роль персонала в развитии предприятия. Дано понятие мотивации, мотива, представлена мотивация как инструмент воздействия на эффективность труда сотрудников. Определены основные типы и подходы к мотивации персонала в организациях. Рассмотрены внешние и внутренние факторы, оказывающие влияние на мотивацию персонала, выявлены проблемы, связанные с нематериальной мотивацией. Для благоприятного решения этих задач разработан комплекс мер, направленный на мотивирование сотрудников.

Ключевые слова: персонал мотивация, инструмент, труд, эффективность, факторы, проблемы, комплекс мер, стимулирование.

Введение

Кризисная ситуация может послужить компании финансовыми проблемами и утратой своих позиций на рынке, а также потерей квалифицированных кадров, без которых нельзя преодолеть кризис [1]. Одной из самых важных и основных задач менеджмента является удержание ключевых сотрудников, и для того, чтобы достичь эту цель, нужно хорошо информировать персонал и реализовать адекватную систему мотивации. Мотивация является главной движущей силой в поведении и деятельности человека, в том числе, и в процессе формирования будущего персонала [2 – 3].

Основной целью данной статьи является описание проблем стимулирования работников на предприятиях России и причин для дальнейшего эффективного их решения.

Задачи:

1. Рассмотреть мотивацию с точки зрения инструмента воздействия на эффективность труда сотрудников;
2. Выявить факторы мотивации, влияющие на результативность труда персонала;
3. Выявить проблемы мотивации;
4. Определить комплекс мер, направленных на решение проблем, связанных с мотивацией персонала.

Основная часть

Для того чтобы вывести компанию из кризиса, необходимо проведение радикальных преобразований в условиях ограниченности ресурсов. В связи с этим, для проведения антикризисной программы в области управления персоналом нужно решить две главные задачи, такие как: минимизация рисков возникновения конфликтных ситуаций при увольнении сотрудников, а также их удержание и вовлечение в реализацию мероприятий антикризисной программы.

От общих планов компании по выходу из кризиса и выбранных направлений развития зависит то, в какую группу попадут сотрудники — «удерживаемых» или же «увольняемых». Эффективная мотивация позволяет добиться более высоких результатов. Персонал, который понимает, ради чего трудится и каких результатов должен достичь, будет «помогать» предприятию расти и развиваться. Любой руководитель желает, чтобы его сотрудники работали слаженно, самостоятельно и «с огоньком». Насколько реальна эта картина? Прежде всего, необходимо определиться с тем, что такое мотивация? Мотивация — это внутренняя энергия, включающая активность человека в жизни и на работе. Она основывается на мотивах, под которыми имеются в виду конкретные побуждения, стимулы, заставляющие личность действовать и совершать поступки. В качестве мотивов могут выступать в связке эмоции и стремления, интересы и потребности, идеалы и установки. Поэтому мотивы представляют собой сложные динамические системы, в которых осуществляются выбор и принятие решений, анализ и оценка выбора.

Суть мотивации состоит в том, чтобы давать людям то, что они больше всего хотят получить от работы. Чем полнее вы сможете удовлетворить их желания, тем больше у вас шансов получить то, что нужно вам, а именно: производительность, качество, обслуживание и т.д.

Существуют различные факторы мотивации, которые определяют, что является наиболее ценным, важным для человека. Как правило, это не один фактор, а несколько и вместе они составляют карту или набор мотивационных факторов. Факторы мотивации делятся на внешние и внутренние.

Факторы мотивации

| Внутренние факторы мотивации | Внешние факторы мотивации |
|------------------------------|----------------------------|
| Самореализация | Деньги |
| Идеи, творчество | Карьера |
| Самоутверждение | Статус |
| Убежденность | Престижные вещи |
| Любопытство | Эстетика быта |
| Здоровье | Возможность путешествовать |

В России долгое время мотивация персонала не рассматривалась, как инструмент воздействия на эффективность труда сотрудников и благодаря этому достижения целей самого предприятия. Для российских работников не существовало связи между результатом и оплатой труда, то есть зарплата в России не выполняла стимулирующую функцию. На предприятиях роль мотивации не учитывалась и только с недавнего времени менеджмент организаций внедряет различные стимулы. Возможность мотивировать работника со стороны предприятия во многом определяется его положением на рынке и имеющимися ресурсами. Большинство работодателей придерживаются мнения, что материальная мотивация может полностью удовлетворить потребности людей, однако, это не так. Также, во многих организациях люди мало осведомлены о том, каким образом, например, происходит начисление премий или надбавок.

Рассмотрим некоторые проблемы мотивации. К ним можно отнести:

1. Непонимание начисления материальной мотивации;

2. Проблема личностного и карьерного роста;
3. Потеря связи: «результат – оплата»

Заглянув в не столь давнюю историю, вспомним, что во времена Советского союза большим спросом пользовались бесплатные путёвки в санатории и дома отдыха входили в стандартный льготный пакет для абсолютно любого сотрудника. К сожалению, в настоящее время руководство предприятий и организаций практически не уделяет внимания своим подчинённым, а точнее не стараются заинтересовать или как-то удержать на рабочем месте, считая, что незаменимых людей в наше время не существует. Российские организации довольно-таки часто применяют в качестве мотивации не совсем правильный подход, который заключается в запугивании и подавлении работника, руководство делает упор на чувство страха. Сотрудников могут пугать снижением заработной платы, увольнением, лишением премии и т.д. В отличие от России за рубежом такие меры не используются.

Безусловно, что российским менеджерам следует быть ориентированными на богатый опыт и практику западных коллег, но полностью перенимать опыт заграничной системы не следует, так как такой перенос чужого опыта в условия нашей жизни не даст своих плодов, в результате чего эффект будет нулевой. В такой ситуации стоит либо разрабатывать свою систему мотивации и поощрения, либо использовать максимально адаптированные схемы и методы стимулирования персонала. Также не стоит забывать, что нематериальные способы поощрения нужно использовать только в том случае, когда в полной мере удовлетворены все финансовые потребности сотрудника.

Для благоприятного решения этих задач необходима разработка и реализация комплекса мер, которые направлены:

- на адекватное понимание всеми сотрудниками текущей ситуации и перспектив ее развития в соответствии с планами руководства по предотвращению кризисной ситуации;
- на мотивирование сотрудников на необходимые для компании действия, таких как: увольнение или работа в прежней или иной должности.

Достоверная информация о настоящей ситуации в компании и планах выхода из кризиса, распространяемая среди персонала, повысит степень лояльности работников и будет способствовать росту производительности труда. Ознакомление работников с делами компании и понимание своей роли в ней может способствовать росту доверия к руководству и, соответственно, большей поддержке антикризисных мер. Утаивание информации приводит к слухам в организации, и работа коллектива становится менее продуктивной. Сотрудникам нужно предоставлять информацию о том, в какой ситуации находится компания, какие действия запланированы менеджментом для выхода из кризиса, а также, какие цели и задачи поставлены перед ними самими.

Выводы

Подводя итог, можно сказать, что в России управленцы знакомы и с классическими теориями мотивации, и с современными методами стимулирования сотрудников, но применение на практике единичны. Обычно используют стандартные шаблоны, которые практически не действуют, как мотиваторы.

На наш взгляд, для того, чтобы успешно преодолеть кризис компании с меньшими потерями необходимо:

- 1) Осведомлять всех работников о текущей ситуации в компании;
- 2) Создать целевую группу для решения проблем по выходу из кризисной ситуации, например: разработку новых направлений деятельности, реализацию избытка запасов и другие;
- 3) Обеспечение информационной поддержкой изменений, как внутри компании, так и снаружи, для того чтобы поддерживать имидж компании, и показывать ее как постоянно развивающуюся;
- 4) Выявить незадействованных работников и сократить их численность, или же перевод этих сотрудников в другие подразделения компании.

Список литературы

1. Стародубцева В.К. Мотивация студентов к обучению. Сборник научных трудов. Современные проблемы науки и образования, 2014, № 6
2. Пивоваров С. Э., Тарасевич Л. С., Майзель А. И. Международный менеджмент: Учебник для вузов. 4-е изд. СПб.: Санкт-Петербург; 2009.
3. Самоукина Н.В. Эффективная мотивация персонала при минимальных затратах. М.: Вершина, 2008. – 224 с.

PERSPECTIVES OF MOTIVATION OF EMPLOYEES OF RUSSIAN ENTERPRISES IN A CRISIS

Naumova Yu.N., student, e – mail: naumova.yulyasha@yandex.ru

Starodubtseva V.K., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor

Novosibirsk state technical University, Karla Marksa str. 20, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The article describes the role of personnel in the development of the enterprise. The notion of motivation, motive is given, motivation is presented as an instrument of influence on the efficiency of employees' work. The main types and approaches to the motivation of personnel in organizations are determined. External and internal factors affecting the staff motivation are examined, problems related to non-material motivation are revealed. For a favorable solution to these problems, a set of measures has been developed aimed at motivating employees.

Keywords: personnel motivation, tool, work, efficiency, factors, problems, complex measures, incentives