

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Новосибирский государственный технический университет

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева

**ИННОВАЦИИ В
МАШИНОСТРОЕНИИ
(ИнМаш – 2021)**

**INNOVATIONS IN
MECHANICAL
ENGINEERING
(ISPCIME – 2021)**

ХII МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО – ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ, ПОСВЯЩЕННАЯ
ПАМЯТИ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК,
ПРОФЕССОРА РАХИМЯНОВА ХАРИСА
МАГСУМАНОВИЧА

XII INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND
PRACTICAL CONFERENCE
DEDICATED TO THE MEMORY OF
PROFESSOR RAKHIMYANOV KHARIS
MAGSUMANOVICH, DOCTOR OF
TECHNICAL SCIENCES

Сборник трудов

Materials

7 – 9 октября / October 2021 г.

Новосибирск, Россия / Novosibirsk, Russia

УДК 621.002.2:005.591.6 (063)

И 665

Редакционная коллегия:
Никитин Ю.В., Василевская С.И., Кудрявцева Ю.С.

И 665 **Инновации в машиностроении:** сборник трудов XII Международной научно-практической конференции / под ред. С.И. Василевской, Ю.С. Кудрявцевой. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. – 482 с.

ISBN 978-5-7782-4488-7

В сборнике представлены труды 12-ой Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении (ИнМаш – 2021)», посвященные актуальным проблемам машиностроительной отрасли – стратегической отрасли, без которой невозможна стабильная, устойчивая, динамично развивающаяся экономика. Представлены разработки в области оборудования, инновационных технологий, автоматизации производства, горного машиностроения, материаловедения, комбинированных технологий формообразования объектов из труднообрабатываемых материалов, экономики, менеджмента и образования в области машиностроения.

Труды приводятся в авторской редакции. За содержание представленной информации ответственность несут авторы.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Сопредседатели

Никитин Юрий Вадимович – к.т.н., доцент, доцент кафедры технологии машиностроения, НГТУ (г. Новосибирск, Россия)

Иванцовский Владимир Владимирович – д.т.н., проф., профессор кафедры проектирования технологических машин, НГТУ (г. Новосибирск, Россия)

Заместители председателя

Атапин Владимир Григорьевич – д.т.н., проф., профессор кафедры прочности летательных аппаратов НГТУ (г. Новосибирск, Россия);

Балашов Александр Владимирович – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», АлтГТУ (г. Барнаул, Россия)

Блюменштейн Валерий Юрьевич – д.т.н., проф., профессор кафедры технологии машиностроения КузГТУ (г. Кемерово, Россия);

Леонов Сергей Леонидович – д.т.н., проф., профессор кафедры «Технология машиностроения», АлтГТУ (г. Барнаул, Россия)

Овчаренко Александр Григорьевич – д.т.н., проф., заведующий кафедрой технологии машиностроения и качества, БТИ (г. Бийск, Россия)

Члены комитета

Беляев Вячеслав Николаевич – к.т.н., доцент, БТИ АлтГТУ (г. Бийск, Россия);

Верещагина Александра Сергеевна – к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения НГТУ (г. Новосибирск, Россия);

Гилета Виктор Павлович – к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения НГТУ (г. Новосибирск, Россия);

Кудрявцева Юлия Станиславовна – к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения НГТУ (г. Новосибирск, Россия);

Останин Олег Александрович – заместитель начальника научно-инновационного управления КузГТУ, (г. Кемерово, Россия)

Рахимьянов Андрей Харисович – к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения НГТУ (г. Новосибирск, Россия);

Рахимьянов Константин Харисович – к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения НГТУ (г. Новосибирск, Россия);

Секретариат конференции

Василевская Светлана Игоревна – к.т.н., ст. преподаватель кафедры технологии машиностроения НГТУ (г. Новосибирск, Россия);

Иванова Мария Валерьевна – ст. преподаватель кафедры технологии машиностроения НГТУ (г. Новосибирск, Россия);

УДК 621.002.2:005.591.6 (063)

ISBN 978-5-7782-4488-7 © Новосибирский государственный технический университет, 2021

© Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2021

© Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1	SECTION 1
<i>Иновационные технологические процессы изготовления заготовок, деталей и сборки машин</i> <i>СУ Цзянь, Марков А.М.</i>	<i>Innovative technological processes in machine parts manufacturing and assembly technology</i> <i>Su J., Markov A.M.</i>
Методика проектирования операций концевой фрезерования слоистых стекловолоконных композитов <i>Клепцов А.А., Клепцова Л.Н.</i>	Operations design technique for end milling of layered fiberglass composites <i>Alexander A. Kleptsov, Lily N. Kleptsova</i>
Оптимизация технологических процессов с учетом требований к качеству поверхностного слоя деталей <i>Попов А.И., Веселовский А.П., Ермак С.В., Радкевич М.М., Захаров С.В., Лазарев Й.Б.</i>	Optimization of technological processes taking into account the requirements for the state of the surface layer of parts <i>Popov A.I., Veselovsky A.P., Ermak S.V., Johannes Lazarev, Zakharov S.V., Radkevich M.M.</i>
Диагностика частотно - импульсных характеристик струйного электролитно - плазменного разряда <i>Попов А.И., Радкевич М.М., Фумин А.С., Синюков Л.С., Алхенди Яхья М.А.</i>	Pulse frequency diagnostics jet electrolytic-plasma discharge <i>Popov A.I., Radkevich M.M., Fumin A.S., Sinyukov L.S., Alhendi Yahya Mustafa A.</i>
Методология разработки электрод-инструментов для струйной электролитно-плазменной обработки <i>Чигиринский Ю.Л., Чигиринская Н.В., Евтюнин А.В.</i>	Methodology for the development of electrode tools for jet electrolyte-plasma treatment <i>Ju.L. Tchigirinsky, N.V. Chigirinskaya, A.V. Evtynin</i>
Оценка стабильности процессов механической обработки с использованием многомерных регрессионных моделей <i>Унянин А.Н., Семдянкин И.В.</i>	Evaluation of the stability of the machining process using a multivariate regression model <i>Unyanin A.N., Semdyankin I.V.</i>
Моделирование температурного поля при фрезеровании заготовок тонкостенных деталей <i>Крень А.П., Молев С.Г., Кутепов А.Ю., Делендик М.Н.</i>	Modeling of the field when milling thin-walled workpiec <i>Kren A.P., Molev S.G., Kutepov A.Y., Delendik M.N.</i>
Изучение напряженного состояния внутреннего кольца двухрядного подшипника из стали ШХ15СГ <i>Ямников А.С., Богомолов М.Н.</i>	Study of the stress state of the inner ring of a double-row bearing from 100CR6 steel <i>Yamnikov A.S., Bogomolov M.N.</i>
О характере колебаний при обработке тонкостенной втулки сферической фрезой	The nature of vibrations when machining a thin-walled bushing with a spherical milling cutter

<i>Михайлов А.Н., Михайлов Д.А.</i> Технологические особенности повышения ресурса деталей газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально- ориентированных свойств	76	<i>Mikhaylov A.N., Mikhaylov D.A.</i> Technological features of increasing the resource of parts of gas turbine engines based on providing functional-oriented properties
<i>Овчаренко А.Г., Ромашев А.Н., Смирнов В.В., Фирсов А.М.</i> Анализ точности формы отверстия при обработке резцом на радиальной подаче с переменной шириной резания	84	<i>Ovcharenko A.G., Romashev A.N. Smirnov V.V., Firsov A.M.</i> Accuracy analysis of the hole shape during cutting with a cutter with radial feed and variable cutting width
<i>Ардашев Д.В., Гузеев В.И., Дюрягин А.А.</i> Оценка обрабатываемости материала БРАЖ 10, полученного DMD-методом, по критериям силы резания и шероховато- сти обработанной поверхности	92	<i>Ardashev D.V., Guzeev V.I., Dyuryagin A.A.</i> Estimation of machinability of the material CuAl10Fe4 obtained by DMD-method on the criteria of the cutting force and roughness of the pro- cessed surface
<i>Ардашев Д.В., Жуков А.С.</i> Анализ частотного спектра звука процесса круглого наружного врезного шлифования	101	<i>Ardashev D.V., Zhukov A.S.</i> Analysis of the frequency spectrum of the sound of the external circular plunge-cut grinding
<i>Сапунов В.В., Евстигнеев А.Д., Чистяков В.С.</i> Исследование работоспособности лепестковых шлифовальных кругов при обработке заготовок из алюминиевых сплавов	112	<i>Sapunov V.V., Evstigneev A.D., Chistyakov V.S.</i> Research of operability of petal grinding wheels when processing blanks from aluminum alloys
<i>Базров Б.М., Хейфец М.Л., Гуревич В.Л., Соломахо В.Л. Попок Н.Н.</i> Классификация объектов и процессов при цифровизации жизненного цикла изделий машиностроения	119	<i>Bazrov B.M., Kheifetz M.L., Gurevich V.L., Solomakhov L., Popok N.N.</i> Systemology of objects and processes in digitalization of the life cycle of engineering products
<i>Тихонова Ж.С., Крайнев Д.В., Фролов Е.М.</i> Исследование информативности сигнала термоэдс при оценке свойств контактных пар «стальная заготовка – твёрдосплавный инструмент с покрытием»	128	<i>Tikhonova Zh.S., Kraynev D.V., Frolov E.M.</i> Investigation of the informativeness of the thermoemf signal when evaluating the properties of contact pairs "steel billet-coated carbide tool"
<i>Артамонов Е.В., Василега Н.А.</i> Методика оценки рисков и возможностей при эксплуатации сборных режущих инструментов	137	<i>Artamonov E.V., Vasilega N.A.</i> Methodology for assessing risks and opportunities in the operation of prefabricated cutting tools

<i>Василевская С.И., Никитин Ю.В.</i> Установление количественных соотношений между режимными параметрами электрических импульсов и эрозионным разрушением обрабатываемого материала электроэрозионной составляющей в комбинированной обработке при прошивке отверстий малого диаметра	143	<i>Vasilevskaya S.I., Nikitin Yu.V.</i> Determination of the quantitative correlations between the mode parameters of the electric pulses and the erosive destruction of the processed material by the electro-erosive component in the combined machining during piercing the holes of small diameter
<i>Василега Д.С., Васильев Д.В., Василега Н.А.</i> Оптимизация условий обработки труднообрабатываемого материала на основе методики выбора инструментального твердого сплава и режимов резания	153	<i>Vasilega D.S., Vasilev D.V., Vasilega N.A.</i> Optimization of processing conditions of hard-to-process material based on the method of selecting a tool hard alloy and cutting modes
<i>Тверяков А.М., Остапенко М.С., Штин А.С.</i> Цифровизация для повышения качества машиностроительной продукции	159	<i>Tveryakov A.M., Ostapenko M.S., Shtin A.S.</i> Digitalization for improving the quality of machine-building products
<i>Смоленцев В.П.</i> Состояние и развитие электрофизических, электрохимических и комбинированных методов обработки	164	<i>Smolentsev V.P.</i> Condition and development electrophysical, electrochemical and combined processing methods
<i>Рахимьянов К.Х., Украинцева А.А., Иванова М.В.</i> Определение технологических параметров эрозионно-электрохимической обработки	186	<i>Rakhimyanov K.Kh., Ukraintseva A.A., Ivanova M.V.</i> Determination of technological parameters of electrodischarge-electrochemical machining
<i>Рахимьянов К.Х., Иванова М.В., Украинцева А.А.</i> Расчет параметров течения электролита при эрозионно-электрохимической обработке	192	<i>Rakhimyanov K.Kh., Ivanova M.V., Ukraintseva A.A.</i> Calculation of the electrolyte flow parameters of electrodischarge-electrochemical machining
СЕКЦИЯ 2 <i>Новые материалы и способы их конструирования. Управление свойствами материалов в процессах производства и эксплуатации</i>	200	SECTION 2 <i>New materials and methods of material design. Material properties control in production and operation processes</i>
<i>Абабков Н.В., Пимонов М.В., Левашова Е.Е.</i> Микроструктура, акустические и магнитные характеристики поверхностного слоя образцов после наплавки и механической обработки	201	<i>Ababkov N.V., Pimonov M.V., Levasova E.E.</i> Microstructure, acoustic and magnetic characteristics of the surface layer of samples after surfacing and machining

<p><i>Абабков Н.В., Смирнов А.Н.</i> Корреляция между параметрами структуры, механическими свойствами и акустическими и магнитными характеристиками в зонах устойчивой локализации деформаций энергетического оборудования из конструкционной и теплоустойчивой сталей</p>	<p><i>Ababkov N.V., Smirnov A.N.</i> Correlation between structural parameters, mechanical properties, and acoustic and magnetic characteristics in zones of stable localization of power equipment made of structural and heat-resistant steels</p>
<p><i>Соколов И.О., Каспервич А.В., Потапчик А.Н., Володько А.С., Ванюк Э.А., Керель А.Д.</i> Внедрение нанокремниевых компонентов в виде фуллереновой чернил в газотермические полимерные покрытия на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ)</p>	<p><i>Sokorov I.O., Kasperovich A.V., Potapchik A.N., Volodko A.S., Vanyuk E.A., Kerel A.D.</i> Introduction of nanocarbon components in the form of fullerene black in gas-thermal polymer coatings based on ultra-high molecular polyethylene (UHMP)</p>
<p><i>Каменева А.Л., Бублик Н.В.</i> Зависимость электрохимических и физико-механических свойств покрытия AlTiN от материала подложки</p>	<p><i>Kameneva A.L., Bublik N.V.</i> Dependence of electrochemical and physico-mechanical properties of the alTiN coating on the substrate material</p>
<p><i>Ситников А.А., Яковлев В.И., Собакин А.В., Логинова М.В., Мясников А.Ю., Сыровежкин М.Р., Градобоев А.В.</i> Исследование облученных гамма-квантами механоактивированных смесей системы Ti-AL</p>	<p><i>Sitnikov A.A., Yakovlev V.I., Sobachkin A.V., Loginova M.V., Myasnikov A.Yu., Syrovezhkin M.R., Gradoboev A.V.</i> Investigation of mechanically activated mixtures of the Ti-AL system irradiated with gamma quanta</p>
<p><i>Федотов В.В., Осипов А.П., Киселёв Е.С.</i> Экспериментальное определение штучной плотности абразивного материала</p>	<p><i>Fedotov V.V., Osipov A.P., Kiselev E.S.</i> Experimental determination of the abrasive material real unit density</p>
<p><i>Проценко А.Е., Проценко А.Н., Шакирова О.Г., Петров В.В., Малышева Д.П., Желевская Д.Д.</i> Исследование каталитической активности комплекса 2,3,5-трифенилтетразолия хлористого с бромидом меди (II) в реакции отверждения эпоксивинилэфирного связующего</p>	<p><i>Protsenko A.E., Protsenko A.N., Shakirova O.G., Petrov V.V., Malysheva D.P., Zhelevskaya D.D.</i> Research of the catalytic activity of the complex of 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride with copper (II) bromide in the epoxy vinyl ester resin curing reaction</p>
<p><i>Протасеня Т.А., Крень А.П.</i> Модели упругопластического деформирования полимерных композиционных материалов, полученных путем аддитивного синтеза, при их ударном нагружении жестким индентором</p>	<p><i>Pratasenia T.A., Kren A.P.</i> Models of elastoplastic straining of polymeric composite materials obtained by additive synthesis under impact loading by a rigid indenter</p>

<i>Сапунов В.В., Веткасов Н.И., Варламов С.А.</i> Механическое легирование алюминия углеродными нанотрубками	253	<i>Sapunov V.V., Vetkasov N.I., Varlamov S.A.</i> Mechanical alloying of aluminum with carbon nanotubes
<i>Шевцова Л.И., Немолочнов Д.А.</i> Влияние никеля на структуру и свойства Ni₃Al, полученного методом электроискрового спекания	260	<i>Shevtsova L.I., Nemolochnov D.A.</i> Influence of nickel on the structure and properties of Ni₃Al obtained by spark plasma sintering
<i>Шолоник В.Е., Гориченко С.Ф., Анисович А.Г., Гаркун А.С., Крень А.П., Асадчая М.В., Баев А.Р.</i> Анализ причин разрушения элементов газораспределительной системы	265	<i>Sholonik V.E., Gorichenko S.F., Anisovich A.G., Garkun A.S., Kren A.P., Asadchaya M.V., Baev A.R.</i> Analysis of causes of destroying elements of the gas distribution system
<i>Ерёмина К.П., Химухин С.Н.</i> Исследование оксидов на покрытиях из алюминиды никеля, полученных методом электроискрового легирования	271	<i>Eremina K.P., Khimukhin S.N.</i> Investigation of oxides on nickel aluminide coatings obtained by the method of electrospark deposition
СЕКЦИЯ 3 <i>Горное машиностроение</i>	278	SECTION 3 <i>Mining machinery manufacturing</i>
<i>Дубов Г.М., Богомолов А.Р., Нохрин С.А., Трухнов Л.И.</i> Исследование коррозионного влияния охлаждающей жидкости на двигатель CUMMINS KTA 50 газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ 75131	279	<i>Dubov G.M., Bogomolov A.R., Nokhrin S.A., Truhnov L.I.</i> Research of cooling liquid corrosion effect on CUMMINS KTA 50 engine of gas-diesel BelAZ 75131 dump truck
<i>Дубов Г.М., Богомолов А.Р., Азиханов С.С., Нохрин С.А.</i> Разработка измерительного комплекса для карьерного самосвала БелАЗ, работающего по газодизельному циклу	287	<i>Dubov G.M., Bogomolov A.R., Azikhanov S.S., Nokhrin S.A.</i> Development of the instrumentation system for gas-and-diesel fuelled BelAZ dump truck
<i>Ельцов И.Е., Чегошев А.А., Нохрин С.А.</i> Анализ криогенных бортовых топливных систем и теплообменных аппаратов, обеспечивающих двухтопливный (газодизельный) режим эксплуатации карьерных самосвалов	295	<i>Eltsov I.E., Chegoshev A.A., Nokhrin S.A.</i> Analysis of on-board cryogenic fuel systems and heat exchangers providing dual-fuel (gas-diesel) operation of mining dump trucks
<i>Нохрин С.А., Ельцов И.Е., Чегошев А.А.</i> Реконструкция палубы карьерного самосвала БелАЗ 75131 для обеспечения его эксплуатации в газодизельном режиме	303	<i>Nokhrin S.A., Eltsov I.E., Chegoshev A.A.</i> Reconstruction of the BelAZ 75131 dump truck deck to provide its gas-diesel operation
<i>Чегошев А.А., Нохрин С.А., Ельцов И.Е.</i> Сжиженный природный газ, как альтернатива дизельному (нефтяному) топливу для карьерных самосвалов БелАЗ	311	<i>Chegoshev A.A., Nokhrin S.A., Eltsov I.E.</i> Liquefied natural gas as an alternative to diesel (oil) fuel for belaz mining dump trucks

СЕКЦИЯ 4	SECTION 4
<i>Средства технологического оснащения и автоматизация машиностроительных производств</i>	<i>Technological equipment and automation of mechanical facilities</i>
<i>Балашов А.В., Маркова М.И., Соломин Д.Е., Черепанов Р.С.</i>	<i>Balashov A.V., Markova M.I., Solomin D.E., Cherepanov R.S.</i>
319	319
Специализированный токарный станок	Specialized lathe based
<i>Бобин К.Н., Бобин П.Н., Дединов М.Б., Трушин К.С.</i>	<i>Bobin K.N., Bobin P.N., Detinov M.B., Trushin K.S.</i>
320	320
Экспериментальное исследование возможности применения листового многовиткового индуктора из алюминиевого сплава при плоской листовой штамповке импульсным магнитным полем	Experimental study of the possibility of using a multi-turn aluminum alloy sheet inductor for flat sheet stamping with a pulsed magnetic field
<i>Кряжев Ю.А., Горин Е.Ю.</i>	<i>Kryazhev J.A., Gorin E.J.</i>
335	335
Динамические характеристики сборной торцевой фрезы с демпфирующими элементами при работе на станках с чпу	The dynamic characteristics of an assembled face mill with damping elements while working on cnc machines
<i>Кутышкин А.В., Шашок А.В.</i>	<i>Kutyshkin A.V., Shashok A.V.</i>
342	342
Вероятностная оценка возникновения преимущественных видов отказов при работе кривошипных обрзных прессов	A probabilistic assessment of the occurrence of primary types of failures when operating of the crank presses for deflashing forging
<i>Верецагин В.Ю., Верецагина А.С.</i>	<i>Vereshchagin V.Y., Vereshchagina A.S.</i>
350	350
Влияние конструкции концевых фрез на величину упругих отжатий при фрезеровании стали 12X18H10T	The influence of the design of end mills on the amount of elastic squeezes when milling steel 12X18N10T
<i>Ерошков В.Ю.</i>	<i>Eroshkov V.Yu.</i>
357	357
Использование мобильной координатно-измерительной машины на базе лазерного трекера для калибровки измерительного оборудования стенда перед испытаниями	Use of a portable coordinate-measurement machine with a laser tracker for calibration of test bench measuring equipment before tests
<i>Кудрявцева Ю.С., Пуклаков Д.А.</i>	<i>Kudryavtseva Y.S., Puklakov D.A.</i>
365	365
Расчет напряженно-деформированного состояния материала в соединении ось – шайба при сборке жеребеек прессованием	Stress-strain analysis of the cylinder-washer joint used in the production of chaplets
<i>Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Тищенко Р.Г.</i>	<i>Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Tishchenko R.G.</i>
372	372
Разработка методики оптимизации технологических процессов вибрационной абразивной обработки	Development of optimization techniques technological vibration abrasive processes processing

<i>Черданцев П.О., Черданцев А.О., Животикова О.Е.</i>	380	<i>Cherdantsev P.O., Cherdantsev A.O., Zhivotikova O.E.,</i>
Разработка малого робота-манипулятора ограниченной рабочей области		Development of a small robot manipulator limited workspace
<i>Чижик С.А., Витязь П.А., Хейфец М.Л., Крутько В.С., Грецкий Н.Л.</i>	385	<i>Chizhik S.A., Vitiaz P.A., Kheifetz M.L., Krutko V.S., Gretskiy N.L.</i>
Проектирование технологического оборудования, использующего поля и поток энергии на основе анализа критериев подобия		Design of process equipment using fields and energy flows based on analysis of similarity criteria
<i>Щукин С.Г., Чусовитин Н.А., Концевой А.В.</i>	392	<i>Shchukin S.G., Chusovitin N.A., Kontsevov A.V.</i>
К вопросу наличия стука при работе вибровозбудителя		On the issue of knocking during operation of the vibration exciter
<i>Артамонов Е.В., Тверяков А.М., Штин А.С.</i>	397	<i>Artamonov E.V., Tveryakov A.M., Shtin A.S.</i>
Работоспособность сборных резцов оснащенных сменными режущими пластинами при лезвийной обработке заготовок из стали ЭИ867-ВД		Operability of prefabricated cutters equipped with replaceable cutting plates for blade processing of blanks made of steel EI867-VD
СЕКЦИЯ 5		SECTION 5
<i>Упрочняющие технологии и функциональные покрытия</i>	404	<i>Hardening technology and functional coatings</i>
<i>Махалов М.С.</i>		<i>Makhalov M.S.</i>
Методика исследований остаточных напряжений методами сверления зондирующего отверстия и 2-х экспозиционной спекл фотографии	405	The probe hole drilling and 2-exposure speckle photography residual stress research methods
<i>Блюментейн В.Ю., Митрофанова К.С.</i>	412	<i>Blumenstein V.Yu., Mitrofanova K.S.</i>
Рентгеноструктурный анализ образцов из армко-железа после упрочняющей обработки сложнопрофильным инструментом		X-ray structural analysis of pure-iron samples after hardening treatment with a complex-profile tool
<i>Галай М.С., Ильиных А.С.</i>	419	<i>Galay M.S., Ilinykh A.S.</i>
Упрочнение поверхности оси моста вилочного погрузчика за счет поверхностного пластического деформирования		Hardening of the forklift axle shaft by surface plastic deformation
<i>Шелег В.К., Луцко Н.И., Пилецкая Л.И., Артиукевич А.В.</i>	425	<i>Sheleg V.K., Lutsko N.I., Piletskaia L.I., Artiukevich A.V.</i>
Остаточные напряжения в 2D и 3D мультимодальных покрытиях, нанесенных лазерной наплавкой		Residual stresses in 2D and 3D multimodal coatings deposited by laser cladding

<i>Песин М.В., Макаров В.Ф., Макаренков Е.С., Халтурин О.А.</i>		<i>Pesin M.V., Makarov V.F., Makarenkov E.S., Khalturin O.A.</i>
Технологическое и конструктивное обеспечение качества деталей оборудования для гидроразрыва пласта	431	Technological and structural quality assurance of equipment parts for hydraulic fracturing
<i>Мирошин И.В., Петренко К.П.</i>		<i>Miroshin I.V., Petrenko K.P.</i>
Исследование влияния режимов алмазного выглаживания на шероховатость поверхности деталей центробежных насосов	438	The effect of diamond burnishing parameters on surface roughness of rotary pumps parts
<i>Коротин В.О.</i>		<i>Korotin V.O.</i>
Напыление образцов из стали 30ХГСА методом гиперзвуковой металлизации	445	Spraying of samples made of 30XGSA steel by the method of hypersonic metallization
<i>Учайкин С.Е.</i>		<i>Uchaikin S.E.</i>
МКЭ моделирование процесса обкатывания роликом волнообразной поверхности	451	FEM modeling of surface layer hardening by rolling a wavy surface with a roller
<i>Кречетов А.А.</i>		<i>Krechetov A.A.</i>
Моделирование процесса поверхностного пластического деформирования в условиях мягкой схемы нагружения	458	Deep rolling process modeling by processing force value
СЕКЦИЯ 6		SECTION 6
<i>Подготовка кадров и инновационный менеджмент машиностроительного производства</i>	464	<i>Personnel training and innovative management of mechanical engineering industry</i>
<i>Галимова А.Н., Ударцев А.Д.</i>		<i>Galimova A.N., Udartsev A.D.</i>
Особенности инновационного организационного развития предприятий машиностроительного комплекса	465	Features of innovative organizational development of enterprises of the machine-building complex
<i>Овчаренко А.Г., Фирсов А.М., Ромашев А.Н., Смирнов В.В.</i>		<i>Ovcharenko A.G., Firsov A.M., Romashev A.N., Smirnov V.V.</i>
Особенности перехода на ФГОС во 3++ для бакалавров в области машиностроения	472	Features of the transition to the fses in 3++ for bachelors in mechanical engineering
<i>Сапожников П.А., Коложвари Ю.Б.</i>		<i>Sapozhnikov P.A., Kolozhvari Y.B.</i>
Эволюция классификаций цифровых бизнес-моделей в рамках развития цифровой экономики	478	Evolution of classifications of digital business models in the framework of development of the digital economy



Уважаемые коллеги!

Приветствую участников и гостей XII Международной научно-практической конференции «ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ-2021».

Проводимая по инициативе ученых – машиностроителей 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, международная научно-практическая конференция подтверждает наше горячее стремление к инновационному развитию машиностроения.

Настоящая конференция посвящена памяти доктора технических наук, профессора, члена-корреспондента Сибирского отделения Академии наук высшей школы, почетного работника высшего профессионального образования Российской Федерации Рахимянова Хариса Магсумановича.

В Новосибирском государственном техническом университете под руководством Хариса Магсумановича Рахимянова был организован центр электрофизических технологий, осуществляющий научно-инновационную деятельность в области лазерных, плазменных, электрохимических,

ультразвуковых технологий. Научно-технические разработки, выполненные под его руководством, внедрены в производство на предприятиях Уральского и Сибирского регионов.

Он был, бесспорно, талантливым человеком, большим ученым, отличался исключительным трудолюбием, ответственностью, порядочностью, преданностью своему делу и огромным желанием направить свои знания, идеи и опыт на помощь людям.

Харис Магсуманович обладал исключительным обаянием, прекрасным чувством юмора, был легким в общении, мгновенно располагал к себе людей, дарил каждому заряд позитивной энергии, был чутким, проникательным, мог поддержать в сложные моменты, дарил уверенность, оптимизм и положительный настрой. Эта большая утрата для российской научной школы технологии машиностроения.

Харис Магсуманович оставил после себя не только добрую память, но и большое количество учеников, единомышленников. Надеюсь, что научные планы и разработки Хариса Магсумановича будут достойно реализованы его учениками и соратниками.

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

А.А. Батаев

СЕКЦИЯ 1

*Инновационные
технологические
процессы
изготовления
заготовок,
деталей и
сборки машин*

SECTION 1

*Innovative
technological
processes in
machine parts
manufacturing
and assembly
technology*

УДК 621.914.1

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ КОНЦЕВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ СЛОИСТЫХ СТЕКЛОВОЛОКОННЫХ КОМПОЗИТОВ

*СУ Цзянь, аспирант,
e-mail: 278507234@qq.com
МАРКОВ Андрей Михайлович, доктор техн. наук, профессор,
e-mail: andmarkov@inbox.ru*

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 656038,
Российская Федерация, г. Барнаул, пр. Ленина, 46

Аннотация

На сегодняшний день стеклопластик является одним из наиболее распространенных композиционных материалов, поэтому его механическая обработка продолжает быть объектом исследований. Целью данной работы является исследование влияния режимов обработки на расслоение и шероховатость стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании, а также создание методики проектирования операций концевого фрезерования слоистых стекловолоконных композитов. Актуальность работы обусловлена тем, что расслоение, наряду с шероховатостью, оказывает существенное влияние на качество обработки и последующей сборки готового изделия. Предложен критерий для оценки величины расслоения композиционных материалов в процессе их механической обработки. Представлены результаты экспериментальных исследований относительного коэффициента расслоения и шероховатости поверхности от режимов резания. Был проведен практический расчет по представленной методике. Представленные результаты подтверждают перспективность развиваемого подхода, направленного на обработку новых классов композиционных материалов.

Ключевые слова: фрезерование, расслоение, композиционный материал, режимы резания.

Введение

В современных условиях важнейшей характеристикой производства является гибкость, т.е. способность к быстрым переналадкам и выпуску новой продукции малыми партиями. Для этого помимо производственных мощностей требуются современные методики проектирования операций, позволяющие оперативно осуществлять технологическую подготовку производственного процесса с целью обеспечения заданного качества обработки при максимальной производительности. В то время как при обработке традиционных материалов трудностей, как правило, не возникает, при обработке композитов все еще имеется ряд нерешенных проблем. Одной из них является расслоение поверхностного слоя деталей в процессе механической обработки [2, 3, 8-11]. Оно существенно влияет на качество обработки и последующей сборки, а также на эксплуатационные характеристики готового изделия.

Описание теоретических и экспериментальных исследований

При механической обработке слоистых стекловолоконных композитов нередко возникает дефект поверхности в виде расслоения. Деталь, обработанная концевым фрезерованием, обладающая данным дефектом представлена на рисунке 1а и ее трехмерная модель – на рисунке 1б.

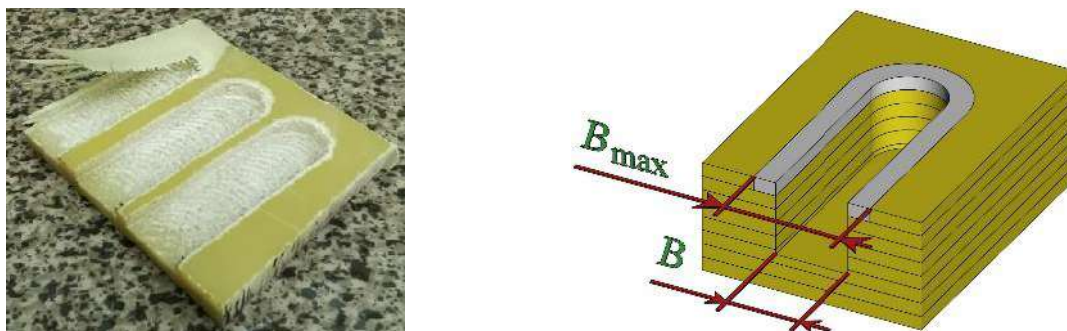


Рисунок 1 – Деталь с расслоением, после концевой фрезерования (а) и ее 3D модель (б)

Для оценки величины расслоения нами предложено использовать относительный коэффициент расслоения δ определяющийся по формуле:

$$\delta = \frac{B_{max} - B}{B} \cdot 100\% = \frac{(B + 2\Delta) - B}{B} \cdot 100\% = \frac{2\Delta}{B} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где B_{max} – максимальная ширина паза по границам области расслоения, мм;
 B – номинальная ширина паза, мм;
 Δ – максимальная ширина области расслоения, мм.

Он позволяет устанавливать какой процент от номинального размера паза составляет размер области расслоения и является показателем для оценки качества обработки.

Были проведены экспериментальные исследования слоистых стекловолоконных композитов при однопроходной обработке паза, при фрезеровании по контуру паза с предварительным центральным проходом (рисунок 2а) и без него (рисунок 2б).



Рисунок 2 – Фрезерования по контуру паза с предварительным центральным проходом (а) и без него (б)

В качестве исследуемого композиционного материала использовался стеклотекстолит марки 3240 (Китай). В качестве инструмента при однопроходной обработке паза использовалась концевая четырехзубая фреза из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром $d_{\phi} = 10$ мм, при фрезеровании по контуру паза – концевая четырехзубая фреза из Р6М5 диаметром $d_{\phi} = 6$ мм (рисунок 3).

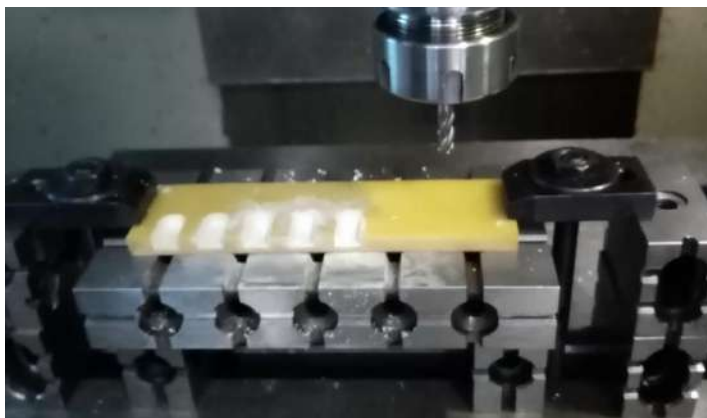


Рисунок 3 – Концевое фрезерование по контуру паза

Режимы обработки варьировались в следующих диапазонах:

- подача на зуб S_z от 0,06 до 0,15 мм/зуб;
- скорость резания V от 12,6 до 31,4 м/мин.

Глубина резания t была равна 5 мм.

После получения экспериментальных данных была проведена их обработка с использованием математического аппарата метода полного факторного эксперимента (ПФЭ).

При однопроходной обработке паза:

$$\delta = 18,902 + 90S_z - 0,282V. \quad (2)$$

При фрезеровании по контуру паза с предварительным центральным проходом (рисунок 2а):

$$\delta = 1,8 + 90S_z. \quad (3)$$

При фрезеровании по контуру паза без предварительного центрального прохода (рисунок 2б):

$$\delta = -0,477 + 66,667S_z + 0,149V. \quad (4)$$

Также была получена зависимость шероховатости Ra (мкм) от режимов фрезерования:

$$Ra = 3,5t^{-0,116}S_z^{0,369}V^{0,261}. \quad (5)$$

При исследовании шероховатости режимы обработки варьировались в следующих диапазонах:

- глубина резания t от 1 до 5 мм;
- подача на зуб S_z от 0,06 до 0,25 мм/зуб;

– скорость резания V от 12,6 до 31,4 м/мин.

На основании полученных экспериментальных данных был разработан алгоритм проектирования операций концевое фрезерование по критерию ограничения величины расслоения и при условии обеспечения заданной шероховатости обработанной поверхности слоистых стекловолоконных композитов (рисунок 4).

Техническое задание на проектирование операции концевое фрезерование должно включать чертеж или 3D модель обрабатываемой детали, максимально допустимые значения относительного коэффициента расслоения δ_{\max} (%) и шероховатости обработанной поверхности Ra_{\max} (мкм), требования к производительности обработки.

Расчеты производятся для однопроходной обработки паза, для фрезерования по контуру паза с предварительным центральным проходом и без него. Также может рассматриваться вариант фрезерования по контуру паза при интенсификации режимов обработки на предварительном центральном проходе. По завершении расчетов производится сравнение полученных результатов и выбор наиболее предпочтительного варианта обработки.

Основное время обработки, мин:

$$T_o = \frac{L_p \cdot i}{S_M}, \quad (6)$$

где L_p – расчетная длина рабочего хода, мм;
 i – число рабочих ходов в переходе, $i=1$;
 S_M – минутная подача инструмента (или заготовки) в направлении подачи, мм/мин.
 Расчетная длина рабочего хода, мм:

$$L_p = L_o + l_{вр} + l_{сх}, \quad (7)$$

где L_o – длина обрабатываемой поверхности (в направлении подачи), мм;
 $l_{вр}, l_{сх}$ – длина врезания и схода инструмента, мм.

1. При однопроходной обработке паза:

$$L_o = l_n, \quad (8)$$

где l_n – длина паза, мм;
 Длина врезания инструмента $l_{вр} = 3$ мм.
 Длина схода инструмента $l_{сх} = 0$.

Таким образом, расчетная длина рабочего хода L_p при однопроходной обработке паза рассчитывается по формуле:

$$L_p = 3 + l_n. \quad (9)$$

2. При концевом фрезеровании по контуру обрабатываемого паза с предварительным центральным проходом:

$$L_o = l_n - \frac{B - d_\phi}{2} + 2 \left(l_n - \frac{B}{2} \right) + \frac{\pi B}{2} = 3l_n + \frac{\pi B - 3B + d_\phi}{2}, \quad (10)$$

где B – номинальная ширина паза, мм;

d_ϕ – диаметр концевой фрезы, мм.

Длина врезания инструмента $l_{ep} = 6$ мм.

Длина схода инструмента $l_{cx} = 3$ мм.

Таким образом, расчетная длина рабочего хода L_p при концевом фрезеровании по контуру обрабатываемого паза с предварительным центральным проходом рассчитывается по формуле:

$$L_p = 9 + 3l_n + \frac{\pi B - 3B + d_\phi}{2}. \quad (11)$$

3. При концевом фрезеровании по контуру обрабатываемого паза без предварительного центрального прохода:

$$L_o = 2 \left(l_n - \frac{B}{2} \right) + \frac{\pi B}{2} = 2l_n + \frac{\pi B - 2B}{2}. \quad (12)$$

Длина врезания инструмента $l_{ep} = 3$ мм.

Длина схода инструмента $l_{cx} = 3$ мм.

Таким образом, расчетная длина рабочего хода L_p при концевом фрезеровании по контуру обрабатываемого паза без предварительного центрального прохода рассчитывается по формуле:

$$L_p = 6 + 2l_n + \frac{\pi B - 2B}{2}. \quad (13)$$

4. При концевом фрезеровании по контуру обрабатываемого паза с интенсификацией режимов обработки на предварительном центральном проходе необходимо определить расчетную длину рабочего хода при предварительной однопроходной обработке паза и при последующем фрезеровании по контуру паза.

При предварительной однопроходной обработке паза:

$$L_o = l_n - \frac{B - d_\phi}{2}. \quad (14)$$

Длина врезания инструмента $l_{ep} = 3$ мм.

Длина схода инструмента $l_{cx} = 0$.

Таким образом, расчетная длина рабочего хода L_p при предварительной однопроходной обработке паза рассчитывается по формуле:

$$L_p = 3 + l_n - \frac{B - d_\phi}{2}. \quad (15)$$

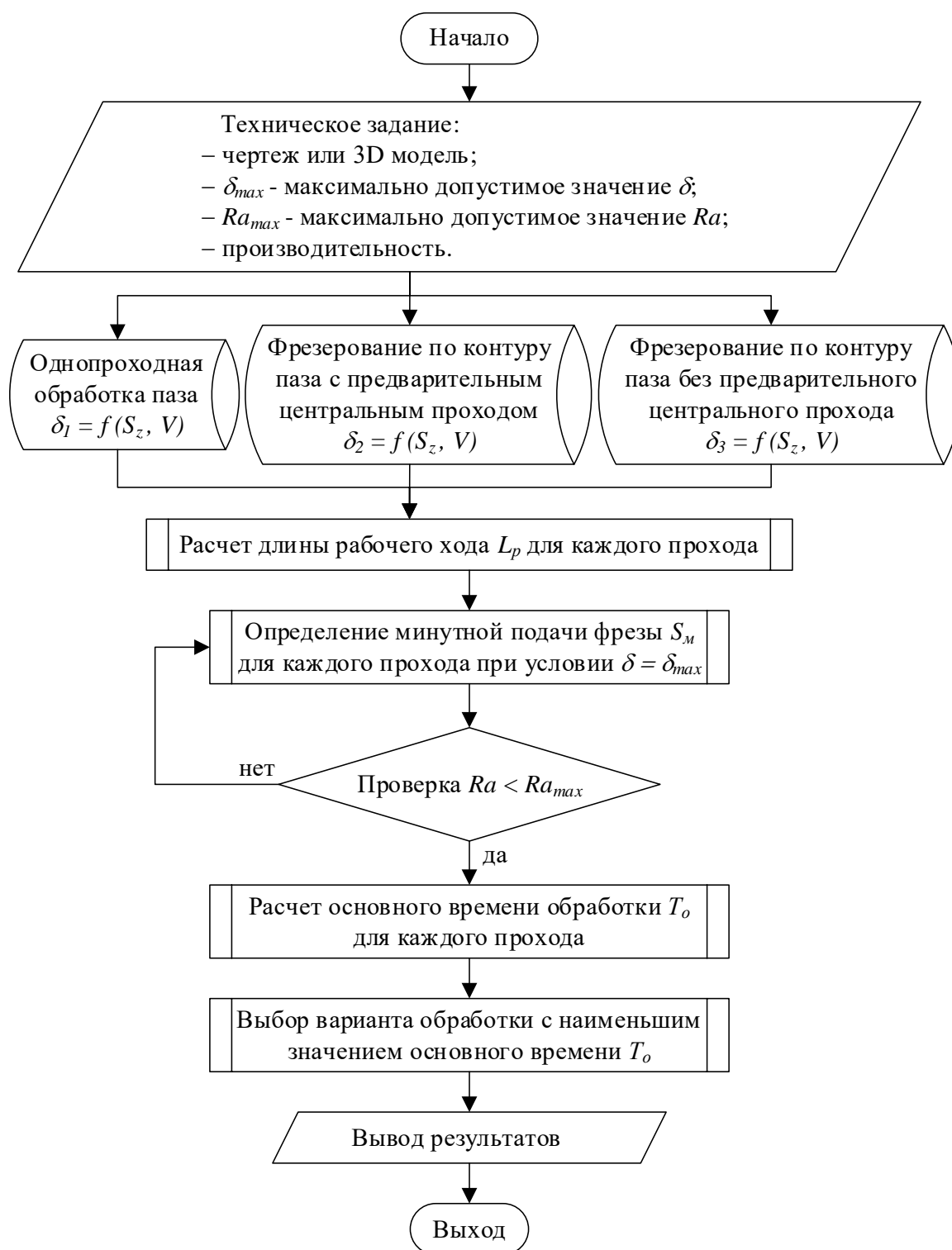


Рисунок 4 – Алгоритм проектирования операций концевое фрезерования

Минутная подача инструмента (или заготовки) в направлении подачи, мм/мин:

$$S_m = S_o \cdot n = S_z \cdot z \cdot n, \quad (16)$$

где S_o – подача на оборот, мм/об;
 n – частота вращения фрезы, об/мин;
 S_z – подача на зуб, мм/зуб;
 z – число зубьев фрезы.
 Частота вращения фрезы, об/мин:

$$n = \frac{1000V}{\pi d_\phi}, \quad (17)$$

где V – скорость резания, м/мин.

Таким образом, минутная подача инструмента (или заготовки) в направлении подачи S_m рассчитывается по формуле:

$$S_m = \frac{1000V \cdot S_z \cdot z}{\pi d_\phi}. \quad (18)$$

Проверка выполнения требований к шероховатости обработанной поверхности слоистых стекловолоконных композитов $Ra < Ra_{max}$ производится с использованием эмпирической формулы (5). При невыполнении заданных требований производится корректировка величин подачи на зуб S_z и скорости резания V .

С использованной данной методики был проведен практический расчет для детали «Распорка» (рисунок 5а), имеющей паз длиной $l_{\text{п}} = 80$ мм и номинальной шириной $B = 10$ мм (рисунок 5б), с наибольшим допустимым значением относительного коэффициента расслоения $\delta = 8\%$ при условии обеспечения шероховатости на уровне $Ra = 3,2$ мкм и при максимально возможной производительности.

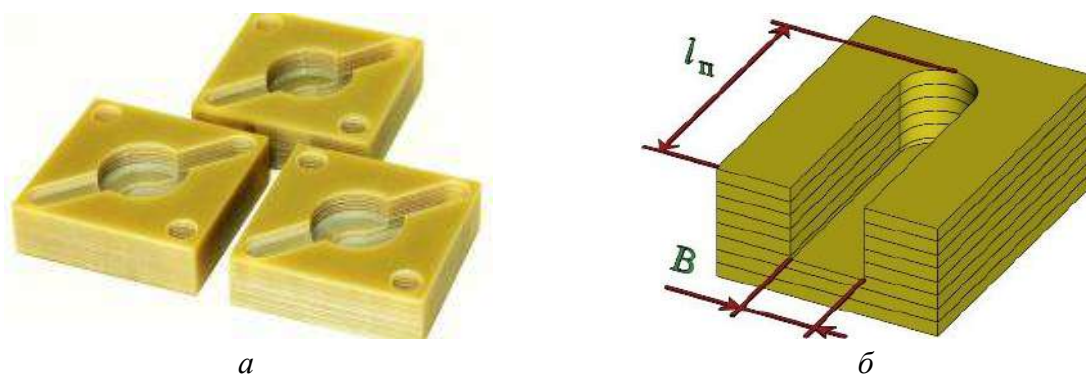


Рисунок 5 – Обрабатываемые детали «Распорка» (а) и условные размеры обрабатываемого паза (б)

Было установлено что при однопроходной обработке паза невозможно обеспечить значение относительного коэффициента расслоения $\delta = 8\%$.

При концевом фрезеровании по контуру обрабатываемого паза с предварительным центральным проходом для обеспечения $\delta = 8\%$ значение подачи на зуб $S_z = 0,07$ мм/зуб. Для достижения наибольшей производительности необходимо, чтобы скорость резания V была максимальной из диапазона исследований $V = 31,4$ м/мин.

При концевом фрезеровании по контуру обрабатываемого паза без предварительного центрального прохода для обеспечения $\delta = 8\%$ должно выполняться следующее условие:

$$V = 56,9 - 447,4S_z. \quad (19)$$

По критерию наибольшей производительности по формуле (19) из диапазона исследований было найдено следующее сочетание подачи на зуб S_z и скорости резания V : $S_z = 0,06$ мм/зуб; $V = 30$ м/мин.

При концевом фрезеровании по контуру обрабатываемого паза с интенсификацией режимов обработки на предварительном центральном проходе была определена подача на зуб S_z и скорость резания V при предварительной однопроходной обработке паза и при последующем фрезеровании по контуру паза.

При предварительной однопроходной обработке паза из диапазона исследований были выбраны максимальные значения подачи на зуб S_z и скорости резания V : $S_z = 0,15$ мм/зуб; $V = 31,4$ м/мин.

При последующем фрезеровании по контуру паза для обеспечения $\delta = 8\%$ значение подачи на зуб $S_z = 0,07$ мм/зуб. Для достижения наибольшей производительности необходимо, чтобы скорость резания V была максимальной из диапазона исследований $V = 31,4$ м/мин.

После этого по значениям скорости резания V и подачи на зуб S_z при известном числе зубьев фрезы $z = 4$ по формуле (18) была определена минутная подача фрезы S_m , мм/мин.

Была проведена проверка обеспечения заданной шероховатости обработанной поверхности слоистых стекловолоконных композитов по формуле (5).

При концевом фрезеровании по контуру обрабатываемого паза с предварительным центральным проходом при $S_z = 0,07$ мм/зуб; $V = 31,4$ м/мин; шероховатость $Ra = 2,7$ мкм;

При концевом фрезеровании по контуру обрабатываемого паза без предварительного центрального прохода при $S_z = 0,06$ мм/зуб; $V = 30$ м/мин; шероховатость $Ra = 2,5$ мкм.

При предварительной однопроходной обработке паза при $S_z = 0,15$ мм/зуб; $V = 31,4$ м/мин; шероховатость $Ra = 3,5$ мкм.

При последующем фрезеровании по контуру паза при $S_z = 0,07$ мм/зуб; $V = 31,4$ м/мин; шероховатость $Ra = 2,7$ мкм.

Все полученные значения, кроме шероховатости при предварительной однопроходной обработке паза, удовлетворяют предъявляемым требованиям. Таким образом, требования к шероховатости не являются в данном случае определяющими.

Далее по формуле (6) было рассчитано основное время обработки T_o , мин.

Результаты и обсуждение

Результаты практического расчета по представленной методике для детали «Распорка» были сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты анализа вариантов обработки паза детали «Распорка»

Вариант обработки	L_p , мм	S_M , мм/мин при $\delta = 8\%$	T_o , мин		
Однопроходная обработка паза	83	–	–		
Фрезерование по контуру паза с предварительным центральным проходом	252,7	466	0,54		
Фрезерование по контуру паза без предварительного центрального прохода	171,7	382	0,45		
Фрезерование по контуру паза при интенсификации режимов обработки на предварительном центральном проходе	предварительная однопроходная обработка паза	81	1000	0,08	0,45
	последующее фрезерование по контуру паза	171,7	466	0,37	

За счет интенсификации режимов обработки на предварительном центральном проходе перед последующей контурной обработкой удалось достичь той же производительности, однако при этом вероятно увеличение износа фрезы, а следовательно, и затрат на инструмент. Таким образом, вариант обработки по контуру обрабатываемого паза без предварительного центрального прохода является наиболее предпочтительным.

Выводы

Предложенная методика проектирования операций концевое фрезерования даст возможность технологам по критерию ограничения величины расслоения и при условии обеспечения заданной шероховатости обработанной поверхности слоистых стекловолоконных композитов оперативно назначать рациональные технологические параметры при проектировании фрезерных операций. Это позволит на этапе освоения нового изделия избежать проведения поисковых экспериментов, существенно сократить сроки подготовки партии опытных образцов и будет способствовать повышению гибкости производства.

Список литературы

1. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с. – ISBN 5-7782-0315-2.
2. Марков А.М. Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов // Научно-технические проблемы машиностроения. – 2014. – № 7 (37). – С. 3–8.
3. Марков А.М., Счиггел Н. Обеспечение качества изготовления деталей из композита // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2017): сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции, 28–30 сентября 2017 г. – Новосибирск, 2017. – С. 219–225.
4. Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Сидоренко С.А. Повышение эффективности процесса подготовки производства изделий из композитов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 1. – С. 20–29. – DOI: 10.17212/1994-6309-2017-1-20-29.
5. Петров М.Г. Оценка структурного состояния композиционных материалов в процессе разрушения // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 4. – С. 61–67.
6. Рычков Д.А., Янюшкин А.С. Способ повышения эффективности производства из-

делий из полимерных композитов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2016. – № 3. – С. 23–30. – DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30.

7. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Мулюхин Н.В. Пути решения проблем формообразования режущего инструмента для обработки неметаллических композитов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 36–46. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.3-36-46.

8. Delamination failure of a woven glass fiber composite / T. Ebeling, A. Hiltner, E. Baer, I.M. Fraser, M.L. Orton // *Journal of Composite Materials*. – 1997. – Vol. 31, iss. 13. – P. 1318–1333. – DOI: 10.1177/002199839703101304.

9. Delamination resistance of composite laminated structures reinforced with angled, threaded, and anchored Z-pins / A. Virakthi, S.W. Kwon, S.W. Lee, M.E. Robeson // *Journal of Composite Materials*. – 2018. – Vol.53, iss. 11. – DOI: 10.1177/0021998318805201.

10. Krishnamoorthy A., Boopathy S.R., Palanikumar K. Delamination analysis in drilling of cfrp composites using response surface methodology // *Journal of Composite Materials*. – 2009. – Vol. 43, iss. 24. – P. 2885–2902. – DOI: 10.1177/0021998309345309.

11. Matthews F.L., Rawlings R.D. *Composite materials: engineering and science*. – Oxford: The Alden Press, 1999. – 480 p. – ISBN 978-1-8557-3473-9.

OPERATIONS DESIGN TECHNIQUE FOR END MILLING OF LAYERED FIBERGLASS COMPOSITES

Su J., post graduate student, e-mail: 278507234@qq.com

Markov A.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: andmarkov@inbox.ru

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

Abstract

Today fiberglass is one of the most common composite materials. Therefore, its mechanical processing continues to be the subject of many studies. The purpose of this work is to study the effect of machining modes on delamination and roughness of fiberglass composites during end milling, as well as creation operations design technique for end milling of layered fiberglass composites. The relevance of the study is due to the fact that delamination, along with roughness, has a significant impact on the quality of processing and subsequent assembly of the finished product. A criterion is proposed for assessing the magnitude of the delamination of composite materials during its machining. The results of experimental studies of the relative coefficient of delamination and surface roughness from cutting conditions are presented. A practical calculation was carried out according to the presented technique. The presented results confirm the prospects of the developed approach aimed at machining new classes of composite materials.

Keywords: milling, delamination, composite material, cutting parameters.

УДК

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ

*КЛЕПЦОВ Александр Алексеевич, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: kaa.tma@kuzstu.ru*

*КЛЕПЦОВА Лиля Николаевна, кандидат экон. наук, доцент,
e-mail kln.ap@ruzstu.ru*

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000,
Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Аннотация

Для получения деталей необходимо стремиться не только к достижению заданной точности, но и обеспечивать определенное качество поверхностного слоя. При изготовлении любой детали существует несколько вариантов технологического процесса, обеспечивающих требуемую точность и качество поверхностного слоя. В этой связи актуальной задачей технологии машиностроения является оптимизация технологических процессов по всем этапам их разработки, и, в частности, параметрическая оптимизация. В статье предложена методика оптимизации технологических процессов механической обработки деталей позволяющая назначить оптимальные по себестоимости режимы обработки деталей, обеспечивающие заданную точность обработки деталей, шероховатость и физико-механические характеристики качества их поверхностей. Обосновано использование технологической себестоимости в качестве критерия оптимизации. Для реализации методики разработан алгоритм и программное обеспечение, позволяющие снизить время проектирования технологических процессов и себестоимость обработки деталей и повысить объективность технического нормирования. Приведен вариант использования предложенной методики при нормировании технологического процесса детали типа «тело вращения».

Ключевые слова: технологический процесс, оптимизация, точность, шероховатость, себестоимость, критерий, ограничения, режим обработки.

Введение

При обеспечении качества и надежности выпускаемых изделий основное внимание, как правило, уделяется достижению точности, тогда как другие показатели качества, такие, как характеристики состояния поверхностного слоя деталей, определяющие износостойкость, и, следовательно, надежность деталей зачастую остается без внимания.

Таким образом, для получения деталей, наиболее полно отвечающих своему служебному назначению необходимо стремиться не только к достижению заданной точности, но и обеспечивать определенное качество поверхностного слоя.

Задача получения деталей требуемого качества может быть решена несколькими путями, т.е. может существовать несколько вариантов технологического процесса, обеспечивающих требуемую точность и качество поверхностного слоя. В этой связи одной из важных задач технологии машиностроения является оптимизация технологических процессов по всем этапам их разработки, и, в частности, параметрическая оптимизация.

В настоящее время предложен ряд методик параметрической оптимизации, которые по виду критерия можно отнести к одной из двух групп.

К первой группе относятся методики, использующие технико-экономические критерии – производительность, себестоимость, и т.д. [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Они позволяют обеспечить заданную точность детали при минимально возможных затратах, но их недостаток заключается в том, что качество поверхностного слоя в них учитывается лишь в виде ограничений по шероховатости поверхности.

Другая группа – это методики, использующие технико-технологические критерии, в том числе и показатели качества поверхностного слоя [7, 8, 9]. Они позволяют обеспечить заданную точность деталей и экстремальные значения параметров качества поверхностного слоя. Но в большинстве случаев экстремальные значения параметров качества поверхностного слоя превышают значения, требуемые служебным назначением деталей. Кроме того, критерии, используемые в этих методиках, как правило, не учитывают затрат, связанных с изготовлением деталей.

В предлагаемой методике параметрической оптимизации технологических процессов в качестве показателей физико-механического состояния поверхности используются степень упрочнения и глубина упрочненного слоя. Такой выбор диктуется относительной простотой контроля этих параметров по сравнению, например, с внутренними напряжениями в поверхностном слое.

Установлено [1, 10, 11, 12], что состояние поверхности определяется не только на финишных операциях, но в течение всего процесса обработки деталей, т.е. качество поверхностного слоя после обработки или термообработки зависит от состояния поверхности, полученного на предыдущих операциях, в том числе и на черновых. Следовательно, для более полного учета всех факторов, действующих в процессе обработки математическая модель, используемая при оптимизации технологических процессов, должна учитывать это явление.

При решении задачи оптимизации наиболее важным является вопрос выбора критерия оптимальности принимаемых решений. Установлено [2, 3, 4], что наиболее универсальный критерий эффективности – приведенные затраты на реализацию технологического процесса

$$P_3 = C_n \cdot N + E \cdot K,$$

где C_n – полная себестоимость единицы продукции; N – годовой выпуск изделий; K – капиталовложения (первоначальные затраты); E – коэффициент окупаемости капиталовложений – величина, обратная сроку окупаемости. Они и должны быть приняты в качестве критерия оптимальности. Доказано [2, 3], что параметрическая оптимизация по критерию приведенных затрат дает те же значения технологических параметров, что и параметрическая оптимизация по критерию себестоимости.

Таким образом, критерии структурной оптимизации P_3 и параметрической оптимизации C_n взаимно непротиворечивы. Кроме того, чтобы рассчитать приведенные затраты P_3 , необходимо определить полную себестоимость единицы продукции C_n . Поскольку в состав полной себестоимости входят как затраты, зависящие от технологии изготовления деталей, так и на зависящие от нее, наиболее целесообразным в качестве критерия оптимальности представляется использование так называемой технологической себестоимости – части себестоимости, зависящей от технологии изготовления изделий.

Поэтому в предлагаемой методике параметрической оптимизации технологических процессов в качестве критерия оптимальности принята суммарная технологическая себестоимость группы переходов обработки одной поверхности.

Целевая функция, учитывающая процесс достижения заданного качества деталей, в частности, их точности [2]:

$$\sum_{m=1}^M C_m \rightarrow \min,$$

где

$$C_m = a_{\text{спр } m} \cdot t_{\text{шт } m} + [(1 + \lambda_{cm})/Q_{\tau_m}] \cdot B_{\text{ит } m};$$

$a_{\text{спр } m}$ – суммарная норма затрат на заработную плату рабочего, эксплуатацию оборудования и приспособлений; $B_{\text{ит } m}$ – расходы по эксплуатации кромки инструмента за период стойкости.

Ограничивая поставленную задачу разработкой методики оптимизации группы переходов обработки определенной поверхности, положим, что в общем случае имеется группа M переходов с номерами m от 1 до M . Пусть при данных значениях допуска на размеры заготовки T_0 средней высоты микронеровностей поверхности заготовки Rz_0 , погрешности формы заготовки ρ_0 , степени упрочнения поверхностного слоя заготовки U_0 , общего припуска \bar{Z} , размера партии Q необходимо обеспечить допуск на конечный размер T , шероховатость поверхности детали Rz_M , погрешность формы детали ρ_M , степень и глубину упрочнения поверхностного слоя детали U_M и h_M , фонд рабочего времени обработки деталей T_Q .

Управляющими технологическими параметрами (независимыми переменными) являются: τ_m – период стойкости кромки режущего инструмента; V_m – скорость резания; S_m – подача; Z_m – среднее значение припуска на обработку на данном переходе; i_m – число рабочих ходов на m -переходе; T_m – допуск на межоперационный размер, полученный на m -переходе.

Фазовыми технологическими параметрами являются: ω_m – величина поля рассеивания размеров, полученная на m -переходе; Rz_m – шероховатость поверхности; ρ_m – погрешность формы обрабатываемой поверхности; U_m – степень упрочнения и h_m – глубина упрочненного слоя обрабатываемой поверхности на m -переходе.

Уравнения процесса выглядят следующим образом [3, 4, 9, 8, 11, 13, 14, 15]:

$$\omega_m = T_m - T_{cm} - T_{im}; \quad (1)$$

$$Rz_m = Kz_m \cdot (Z_m/i_m)^{fz_m} \cdot S_m^{qz_m} \cdot V_m^{uz_m}; \quad (2)$$

$$U_m = K_{um} \cdot (Z_m/i_m)^{f_{um}} \cdot S_m^{q_{um}} \cdot V_m^{u_{um}} \cdot U_{m-1}^{b_{um}}; \quad (3)$$

$$h_m = K_{hm} \cdot (Z_m/i_m)^{f_{hm}} \cdot S_m^{q_{hm}} \cdot V_m^{u_{hm}} \cdot h_{m-1}^{b_{hm}}; \quad (4)$$

$$\rho_m = \Delta y^{i_m} \cdot \rho_{m-1}; \quad (5)$$

где T_{cm} , T_{im} – части поля допуска, ограничивающие соответственно систематическую погрешность и погрешность измерения; Kz_m , fz_m , qz_m , uz_m – коэффициенты эмпирической зависимости шероховатости поверхности от различных факторов; K_{um} , f_{um} , q_{um} , u_{um} , b_{um} , K_{hm} , f_{hm} , q_{hm} , u_{hm} , b_{hm} – коэффициенты эмпирической зависимости степени и глубины наклепа от различных факторов; $\Delta y = \frac{dy_m}{d(Z_m/i_m)}$ – коэффициент, определяющий копирование погрешностей в процессе обработки. Он определяется жесткостными характеристиками технологической системы.

Так как упругая деформация технологической системы

$$y_m = K_{ym} \cdot (Z_m/\tau_m)^{f_{ym}} \cdot S^{q_{ym}} \cdot V^{u_{ym}}, \quad (6)$$

то удельное колебание размера динамической настройки при изменении глубины резания Z_m/i_m составит

$$\Delta y = \frac{dy_m}{d(Z_m/i_m)} = f_{ym} \cdot K_{ym} \cdot (Z_m/i_m)^{f_{ym}-1} \cdot S^{q_{ym}} \cdot V^{u_{ym}}. \quad (7)$$

Здесь f_{ym} , K_{ym} , q_{ym} , u_{ym} – коэффициенты эмпирической зависимости размера динамической настройки от различных факторов.

Все ограничения, принятые в методике, можно разделить на четыре группы:

1. Ограничения по качеству детали:

– ограничения по точности

$$T_{ym} < T_m - T_{cm} - T_{im} - T_{nm}; \quad \bar{Z} = \sum_{m+1}^M Z_m; \quad (8, 9)$$

$$\rho_m \leq \rho_{m-1}; \quad \rho_M \leq \rho; \quad (10, 11)$$

$$T_m \leq T_{m-1}; \quad T_M \leq T, \quad (12, 13)$$

показывают необходимость уменьшения погрешностей формы и размеров деталей от перехода к переходу, и на последнем переходе получить заданный размер и величину погрешности формы и погрешности размера детали;

– ограничения по качеству поверхностного слоя

$$Rz_m \leq Rz_{m-1}; \quad Rz_M \leq Rz; \quad (14, 15)$$

$$U_m \leq U_M \leq U_m^*; \quad h_m \leq h_M. \quad (16, 17)$$

Они показывают необходимость уменьшения средней высоты микронеровностей поверхности от перехода к переходу и получения на последнем переходе шероховатости, степени и глубины упрочнения, заданных техническими условиями;

– ограничение, определяющее минимальный припуск, компенсирующий все погрешности заготовки, полученные на предыдущем переходе

$$Z_m - ((T_{m-1} + T_m)/2) > Rz_{m-1} + \sqrt{\rho_{m-1}^2 + \varepsilon_m^2}, \quad (18)$$

где ε_m – погрешность установки детали на данном переходе.

2. Ограничения по технологическим возможностям оборудования:

– по прочности

$$P_m = K_{Pm} \cdot [Z_m + ((T_{m-1} + T_m)/2)/i_m]^{f_{Pm}} \cdot S^{q_{Pm}} \cdot V^{u_{Pm}} \leq P_{qm}; \quad (19)$$

$$R_m = K_{Rm} \cdot [Z_m + ((T_{m-1} + T_m)/2)/i_m]^{f_{Rm}} \cdot S^{q_{Rm}} \cdot V^{u_{Rm}} \leq R_{qm}, \quad (20)$$

где P_m – составляющая силы резания в направлении слабого звена механизма подачи; R_m – составляющая силы резания в направлении наибольшей нагрузки на инструмент (при точении P_x и P_z соответственно); P_{qm} и R_{qm} – допустимые значения составляющих силы резания.

– по мощности резания

$$N_m = R_m \cdot V_m / 6120 \cdot \eta_m \leq N_{gm}, \quad (21)$$

где η_m – КПД оборудования; N_{gm} – допустимая величина мощности.

– по износу режущего инструмента

$$H_m = K_{Hm} \cdot (Z_m / i_m)^{f_{Hm}} \cdot S_m^{q_{Hm}} \cdot V_m^{u_{Hm}} \cdot \tau_m^{\omega_{Hm}} \leq H_{gm}; \quad (22)$$

$$H_{zm} = K_{Hzm} \cdot (Z_m / i_m)^{f_{Hzm}} \cdot S_m^{q_{Hzm}} \cdot V_m^{u_{Hzm}} \cdot \tau_m^{\omega_{Hzm}} \leq H_{zgm}. \quad (23)$$

Здесь H_m и H_{zm} – размерный износ и износ по задней грани инструмента соответственно; H_{gm} и H_{zgm} – допустимые значения размерного износа и износа по задней грани. При точении проходным резцом $H_{zm} = H_m / \tan \alpha$, где α – задний угол.

– по глубине резания

Наибольшая глубина резания ограничивается шириной режущей кромки резца, а наименьшая – условиями стружкообразования:

$$[Z_m - (T_{m-1} + T_m / 2)] / i_m \leq t_{g \max}; \quad (24)$$

$$[Z_m - (T_{m-1} + T_m / 2)] / i_m > t_{g \min}; \quad (25)$$

где $t_{g \max}$ и $t_{g \min}$ – допустимые значения наибольшей и наименьшей глубины резания соответственно.

3. Ограничение по производительности выглядит следующим образом:

$$\sum_{m=1}^M t_{шт m} \leq T_Q / Q, \quad (26)$$

где $t_{шт}$ – штучное время, связанное с m -переходом:

$$t_{шт m} = [b_{\tau_m} \cdot \tau_m + b'_m + b_{Hm} \cdot H_m / (T_m - T_{ym} - T_{cm} - T_{им} - T)] / Q_{\tau_m} + b''_m;$$

$$b_{\tau_m} = (1 + l_{вп m} / L_m) \cdot (1 + \eta_{pm}) \cdot (1 + \lambda_{cm});$$

$$b_{Hm} = (1 + \lambda_{cm}) \cdot t_{om};$$

$$b'_m = (1 + \lambda_{cm}) \cdot (t_{zm} + t_{nm} + t_{om});$$

$$b''_m = t_m \cdot (1 + \eta_{pm});$$

$l_{вп m}$ – длина врезания и перебега режущего инструмента; L_m – длина обрабатываемой поверхности; η_{pm} – коэффициент потерь рабочего времени; λ_{cm} – коэффициент случайной убыли инструмента в результате поломок; t_{nm} – норма времени на размерную настройку и поднастройку технологической системы; t_m – норма времени на смену режущего инструмента.

$$Q_{\tau_m} = \tau_m / t_{om}; \quad (27)$$

где $t_{om} = 2\pi \cdot R_{m-1} \cdot L_m \cdot i_m / 10^3 \cdot S_m \cdot V_m$ – основное время на m -переходе; R_{m-1} – радиус детали, полученный на предыдущем переходе.

Эти ограничения обеспечиваются при оперативном планировании производства [2, 6, 8], и, следовательно, могут не включаться в методику параметрической оптимизации техно-

логического процесса партионной механической обработки, выполняемой в условиях серийного производства.

4. Ограничения по организационно-техническим возможностям основных средств:

$$K_{итм} = \psi \cdot (1 - \lambda_{см}) / p_m \cdot t_{шт\ m} \cdot Q_{\tau_m} \leq K_{идм}, \quad (28)$$

где $K_{итм}$ – расход инструмента за отчетный период времени ψ ; p_m – количество переточек, допускаемых инструментом; $K_{идм}$ – допустимый расход инструмента, определяемый возможностями предприятия.

Кроме основных ограничений при построении алгоритма оптимизации используются вспомогательные ограничения, определяющие верхние и нижние границы варьирования оптимизационных параметров:

$$\begin{aligned} \tau_{m*} &\leq \tau_m \leq \tau_m^*; \\ V_{m*} &\leq V_m \leq V_m^*; \\ Z_{m*} &\leq Z_m \leq Z_m^*; \\ S_{m*} &\leq S_m \leq S_m^*; \\ \delta_{m*} &\leq \delta_m \leq \delta_m^*; \\ i_{m*} &\leq i_m \leq i_m^* \end{aligned} \quad (29)$$

Исходные параметры τ_{m*} , τ_m^* , ..., i_{m*} , i_m^* определяются границами применимости соответствующих зависимостей, кинематическими и динамическими возможностями оборудования.

Предложенная математическая модель процесса обработки детали была использована для создания алгоритма параметрической оптимизации механической обработки. Алгоритм решения сформулированной задачи является центральным. В основу алгоритма положен метод случайного поиска [16].

Укрупненная блок-схема алгоритма приведена на рис. 1.

Большое количество исходных параметров, используемых при решении задачи, потребовало создания входного алгоритма. Этот алгоритм позволяет сформировать массив исходных параметров по сравнительно небольшому количеству исходных данных, полученных в результате проектирования технологических процессов, и, тем самым, значительно сократить время, необходимое для подготовки данных.

На рис. 1 через i обозначен номер члена случайной последовательности оптимизационных параметров. Генерация случайных значений оптимизационных параметров производится с учетом ограничений (29). Далее по формулам (1–6) рассчитываются параметры процесса, и производится проверка ограничений (8–13) и (18–28). Если ограничения выполняются, в случае необходимости производится проверка ограничений по требуемому качеству поверхностного слоя (14–17), и, при выполнении этих условий, рассчитывается значение критерия оптимальности C_i . Результаты расчета C_i сравниваются с предшествующим значением C_{i-1} , и запоминается набор оптимизационных параметров, обеспечивающих меньшее значение критерия. При невыполнении хотя бы одного ограничения, производится генерация следующего пакета оптимизационных параметров.

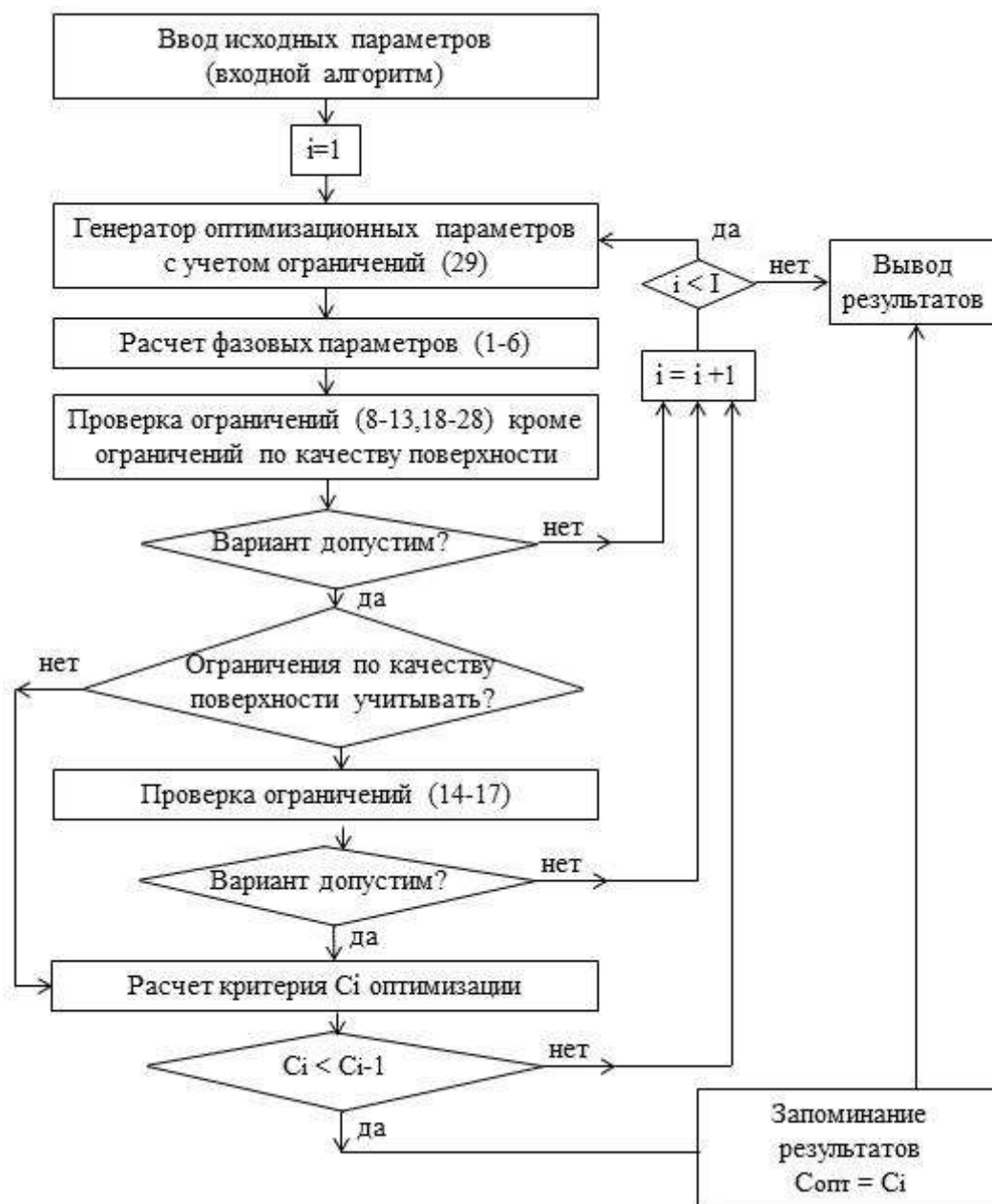


Рисунок 1 – Блок-схема расчета оптимальных технологических параметров

Оптимизационный алгоритм выполняется поочередно для каждой группы переходов обработки каждой поверхности детали.

Кроме того, большое количество исходных параметров, используемых при решении задачи, потребовало создания входного алгоритма. Этот алгоритм позволяет сформировать массив исходных параметров по сравнительно небольшому количеству исходных данных, полученных в результате проектирования технологических процессов, и, тем самым, значительно сократить время, необходимое для подготовки данных.

Центральный и входной алгоритмы реализованы в виде программ на языке DTLPHI-6 для ЭВМ.

Ниже приведен пример расчета оптимальных технологических параметров при точении втулки.

Заготовка втулки – поковка, имеет наружный диаметр $\varnothing 90_{-0,8}$, диаметр отверстия $\varnothing 50^{+0,5}$, длина заготовки 200 ± 1 мм.

При обработке наружной поверхности втулки необходимо получить величину диаметра $\varnothing 80_{-0,1}$, среднюю высоту неровностей не более 20 мкм, степень наклепа поверхностного слоя в интервале от 1,4 до 1,5, глубину распространения наклепа не более 0,2 мм, отклонение от цилиндричности поверхности не более 0,01 мм.

При растачивании отверстия необходимо получить $\varnothing 60^{+0,2}$, среднюю высоту неровностей не более 20 мкм, отклонение от цилиндричности не более 0,01 мм. Физико-механические параметры качества поверхностного слоя при растачивании отверстия не учитывать.

Обработка заготовки ведется по следующему маршруту:

Операция 1

1. Черновое точение наружной поверхности.
2. Черновое растачивание отверстия.

Операция 2

1. Чистовое точение наружной поверхности.
2. Чистовое растачивание отверстия.

Обе операции проводятся на станке мод. 16К20 проходным резцом с механическим креплением твердосплавных пластин Т15К6. Материал детали – сталь 45. Необходимо рассчитать оптимальные режимы обработки партии деталей $Q = 350$ шт.

Результаты расчетов по предложенному алгоритму приведены в табл. 1. В знаменателе указаны значения параметров режима обработки, принятые по нормативам.

В табл. 2 показаны характеристики, качества поверхностного слоя, получаемые при обработке заготовки на рассчитанных режимах, а также себестоимость групп переходов обработки каждой поверхности. В знаменателе указана технологическая себестоимость, определенная для нормативных значений режимов резания.

За счет использования оптимальных режимов себестоимость обработки снижается в 1,4–1,5 раз.

Время решения данной задачи на ЭВМ, включая время на подготовку данных, составляет 18–20 мин, тогда как время «ручного» технического нормирования для данного примера 70–80 минут, т.е. использование разработанного алгоритма повышает производительность технического нормирования в 3,5–5 раз.

Параметрическая оптимизация технологических процессов обработки деталей в большинстве случаев должна осуществляться комплексно, с учетом не только точности обрабатываемых деталей, производительности, стойкости инструмента, но и качества поверхностного слоя. При этом технологическая себестоимость должна быть критерием оптимальности, а шероховатость и физико-механические характеристики поверхностных слоев детали должны учитываться в виде ограничений.

Применение методики оптимизации позволит снизить время проектирования технологических процессов и себестоимость обработки деталей и повысить объективность технического нормирования.

Таблица 1 – Результаты оптимизации по предложенному алгоритму

Номер операции	Номер перепада	Режим резания				Допуск на размер	Стойкость в количестве деталей, шт.	Штучное время, мин	Размер после обработки, мм
		Скорость, м/мин	Подача мм/об	Глубина резания, мм	Число рабочих ходов				
1	1	177/160	0,26/0,47	3,16/3,50	1/1	0,33/0,26	91/66	3,76/6/31	83,68/83,0
	2	177/170	0,18/0,30	2,76/3,50	1/1	0,29/0,23	103/28		55,48/53,0
2	1	235/218	0,18/0,13	1,84/1,5	1/1	0,1/0,1	114/67	3,82/4,39	80,0/80,0
	2	235/220	0,14/0,20	2,24/1,5	1/1	0,2/0,2	124/58		60,0/60,0

Таблица 2 – Характеристики, качества поверхностного слоя, получаемые при обработке заготовки на рассчитанных режимах

Поверхность	Переход	Шероховатость, R_z , мкм	Степень упругости U	Глубина упругого слоя h , мм	Технологическая себестоимость C , усл. ед.
Вал $\varnothing 80_{-0,1}$	1	25,9	1,69/1,83	0,1759	3,518/4,276
	2	19,7	1,45	0,1543	3,510/7,107
					Всего 7,028/11,383
Отверстие $\varnothing 60^{+0,2}$	1	23,5	1,61	0,1703	2,625/3,773
	2	19,1	1,45	0,1624	2,632/4,090
					Всего 5,257/7,863

Предлагаемая методика оптимизации позволяет рассчитать оптимальные по себестоимости режимы обработки деталей, обеспечивающие заданную точность обработки деталей, шероховатость и физико-механические характеристики качества поверхностей.

Список литературы

1. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / С.А. Чижик [и др.]; под общ. ред. М.Л. Хейфеца. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 248 с. – (Технологические комплексы: проектирование, производство, применение). – ISBN 978-985-08-2442-4.
2. Адаптивное управление технологическими процессами (на металлорежущих станках) / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.П. Протопопов. – М. : Машиностроение, 1980. – 535 с.
3. Кутин А.А., Туркин М.В. Критерий структурной оптимизации производственного процесса изготовления сложных деталей машиностроения. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. №10. С. 72–75.
4. Чубуков А.И., Моисеева Л.Т. Оптимизация технологического процесса по двум критериям при изготовлении детали «втулка». Теоретические и практические аспекты разви-

тия современной науки: теория, методология, практика. Сборник статей по материалам II Международной научно-практической конференции. 2020. С. 31–37.

5. Карпов А.В. К вопросу повышения энергетической эффективности технологических процессов обработки резанием. Современные наукоемкие технологии. 2019. №3. С. 43–47.

6. Боршова Л.В. Оптимизация процесса механической обработки деталей сложного профиля. / Боршова Л.В., Пегашкин В.Ф., Миронова М.В. монография / научный редактор В. А. Коротков; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Нижнетагильский технологический институт (филиал). Екатеринбург, 2019.

7. Акинъшин Р.Н. Обеспечение качества поверхностного слоя и снижение технологической себестоимости при токарной обработке. Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2014. Т. 2. №1(19). С. 179–184.

8. Ковалев С.П., Шаймарданов М.Ю. Метод учета технологических ограничений при оптимизации топологии изделий машиностроения. Информационные технологии. 2018. Т. 24. №2. С. 75–80.

9. A. Kleptsov, L. Kleptsova Definition of the Parameters of Surface Layer Based on Functionality of Parts (Web of Science) MATEC Web of Conferences 297, 01001 (2019).

X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME-2019). Kemerovo, Russia, November 26–29, 2019.

DOI <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929701001>

10. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. Монография. М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.

11. V. Blumenstein, M. Makhalov The Metal Surface Layer Mechanical Condition Transformation in Machining Processes. MATEC Web Conf. Volume 297, 2019. X International Scientific and Practical Conference “Innovations in Mechanical Engineering” (ISPCIME-2019). Article Number 05001. Number of page(s) 7. Section: The Strengthening Technologies and Functional Coverings

DOI <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929705001>

Published online 13 November 2019

12. Пимонов М.В. Исследование влияния режимов механической обработки на параметры структурно-фазового состояния поверхностного слоя с применением аппарата механики технологического наследования. / Пимонов М.В., Левашова Е.Е., Глинка А.С., Абабков Н.В., Попова Н.А., Конева Н.А. Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2018. Т. 15. №4. С. 518–525.

13. Qin Guo, Mulan Wang, Youfeng Xu, Yulin Wang. Minimization of surface roughness and tangential cutting force in whirlwind milling of a large screw. Measurement. Volume 152. February 2020. Article 107256.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224119311200>

14. Weiwei Zhang, Kejia Zhuang. Effect of cutting edge microgeometry on surface roughness and white layer in turning AISI 52100 steel. Procedia CIRP Volume 872020 Pages 53–58.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120302055>

15. Rajashree Mallick, Ramanuj Kumar, Amlana Panda, Ashok Kumar Sahoo. Performance characteristics of hardened AISI D2 steel turning: A review. Materials Today: Proceedings. Volume 26, Part 22020. Pages 2685–2690.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320313201>

16. Поварницын И.В. Методы оптимизации. Инновационное развитие современной науки: проблемы, закономерности, перспективы. Сборник статей VII Международной научно-практической конференции: в 2 ч.. 2018. С. 14–16.

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES TAKING INTO ACCOUNT THE REQUIREMENTS FOR THE STATE OF THE SURFACE LAYER OF PARTS

Alexander A. Kleptsov, Cand. Sc. In Engineering, e-mail: kaa.tma@kuzstu.ru

Lily N. Kleptsova, Cand. Sc. In Economy, e-mail: kln.ap@kuzstu.ru

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

Abstract

When machining parts, the main attention is usually paid to achieving accuracy, while other quality indicators, such as characteristics of the surface layer of the parts that determine their wear resistance and reliability, are ignored. To obtain the details that best meet their official appointment, it is necessary to strive not only to achieve a specified accuracy, but also to ensure a certain quality of the surface layer.

In the manufacture of any part, there are several variants of technological process that provide the required accuracy and quality of the surface layer. In this regard, an actual task of engineering technology is the optimization of technological processes at all stages of their development, and, in particular, parametric optimization.

The article proposes a methodology for optimizing the technological processes of mechanical processing of parts that allows you to designate the optimal cost modes for processing parts that provide the specified accuracy of processing parts, roughness and physico-mechanical characteristics of the quality of their surfaces. The use of technological cost as a criterion of optimization is substantiated.

To implement the methodology, an algorithm and software have been developed that reduce the design time of technological processes and the cost of processing parts and increase the objectivity of technical regulation.

A variant of the use of the proposed methodology for the rationing of the technological process of a part of the "body of revolution" type is given.

Keywords: technological process, optimization, accuracy, roughness, cost, criteria, limitations, processing mode.

УДК 621.78

ДИАГНОСТИКА ЧАСТОТНО -ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУЙНОГО ЭЛЕКТРОЛИТНО- ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА

*ПОПОВ Александр Иннокентьевич¹, к.т.н., доцент,
e-mail: popov_ai@spbstu.ru*

*ВЕСЕЛОВСКИЙ Анатолий Платонович, к.т.н., доцент,
e-mail: a_veselovskiy@mail.ru*

*ЕРМАК Сергей Викторович, доктор физ - мат. наук, профессор,
e-mail: serge_ermak@mail.ru*

*РАДКЕВИЧ Михаил Михайлович, доктор техн. наук, профессор,
e-mail: radkevich_mm@spbstu.ru*

*ЗАХАРОВ Сергей Владимирович, аспирант,
e-mail: t80448@mail.co*

*ЛАЗАРЕВ Йоханнес Белайнех, студент,
e-mail: lazarevyohannes@gmail.com*

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Российская Федерация, 194064, Санкт-Петербург, Политехническая улица, 29

Аннотация

Приведены результаты исследования диагностики струйной электролитной плазмы формирующейся между деталью - анодом и полым катодом при атмосферном давлении, комнатной температуре, объемных расходах электролита от 2-90 л/ч и внутреннем диаметре катода 3 мм. В качестве электролита использовался пересыщенный раствор хлорида натрия. Показано, что разная морфология поверхности требует различных условий обработки. Выявлено, что прежде всего данные условия определены разной скоростью потока электролита и разной частотно-импульсной характеристикой электролитно - плазменного разряда. Рассмотрены частотно-импульсные характеристики разряда при разных объемных расходах электролита. Показано, что форма импульсов напряжения с увеличением тока разряда сглаживается практически до прямой линии, а форма импульсов тока формирует сплошной фронт импульсов. Показано что минимальная длительность единичного импульса соответствует диапазону 9-80 нс. Изменение объемного расхода электролита позволяет управлять частотно-импульсными характеристики разряда и выбирать требуемый технологический режим для обработки изделий. Показано, что технологическое применение электролитно - плазменного разряда при использовании средств автоматизации может найти применение для как для финишной так и размерной обработки сложных криволинейных поверхностей, таких как турбинные лопатки, блиски, импеллеры.

Ключевые слова: анод, катод, электролитная плазма, осциллограмма, финишная обработка, размерная обработка, длительность импульсов, турбинные лопатки.

Введение

На сегодняшний день развитие современной российской промышленности невозможно без инновационной составляющей обеспечивающей ее конкурентоспособность за счет применения новых технологий снижающих трудоемкость выпуска продукции и повышаю-

щих ее качество [1]. К таким технологиям относится метод электролитно - плазменной обработки [2,3]. Электролитно-плазменная обработка уже нашла свое широкое применение при закалке диффузионном легировании деталей и полировании деталей в ванне [4-11]. Однако на сегодня все большее развитие находят процессы струйной электролитно-плазменной обработки [12-18]. К преимуществам процесса обработки изделия струей можно отнести низкие энергозатраты, сопоставимую с обработкой в ванне скорость обработки, более высокую точность обработки и экологическую чистоту процесса, возможность проведения как финишных так и операций размерной обработки. Все это делает очень привлекательным использование электролитической струи в качестве неизнашиваемого инструмента. Однако для практического использования необходима стабильность технологического процесса и повторяемость параметров обработки. Это возможно обеспечить за счет более глубокого изучения частотно-импульсных характеристик электрического разряда. В настоящее время работ в этой области недостаточно [10,19,20].

Материалы и оборудование

В нашей работе использовалась опытная установка струйной электролитно-плазменной обработки [2,21]. Данное оборудование разработано в Высшей школе машиностроения СПбПУ.

Для разных технологических операций используются разные виды электролитического разряда. Для финишной обработки используется электролитно плазменный разряд в виде усеченного с двух сторон эллипсоида (рис.1, а). Для размерной обработки используется разряд в виде электролитической струи (рис.1, б).

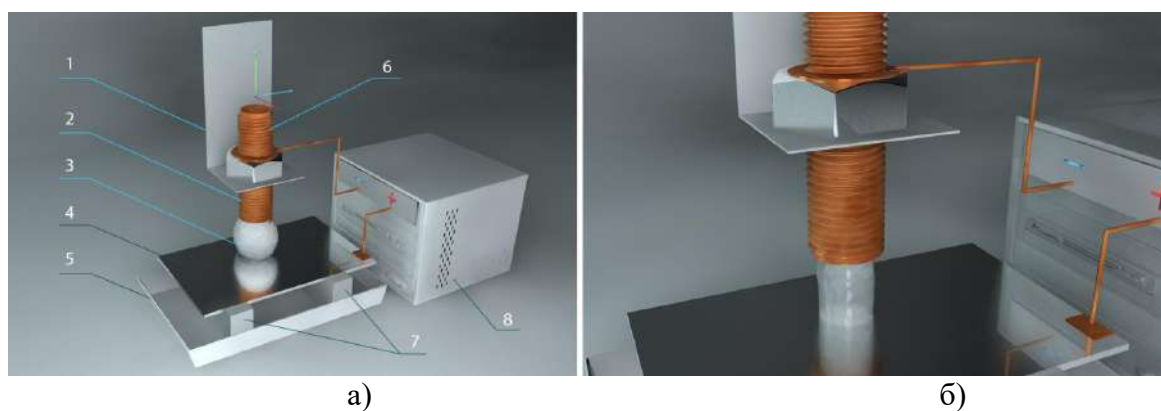


Рисунок 1 – Основные схемы формирования электролитического катода:

- а) - с использованием низкоскоростной струи: 1- держатель полого катода, 2 - полый катод, 3 - электролитно-плазменный разряд, 4 - образец, 5 - ванна, 6 - трубка верхнего бака, 7- керамические опоры, 8 - DC- блок;
- б) с использованием высокоскоростной струи

В экспериментах использовали раствор хлорида натрия с предельной концентрацией 300г/л. Электролит пропускается через медную трубку внутренним диаметром 3мм. Межэлектродный зазор составил 5 мм. Объемный расход электролита G_v исследовали от капельного режима до 90 л/ч. Измеряемый диапазон измерений составил от 100-300 В. В качестве регистрирующих приборов использовались щитовые амперметр и вольтметр OMIХ серии

DV-1-0.5. Погрешность измерения приборов составляет $\pm 0.5\%$. В работе использовался двухканальный осциллограф Hantek с диапазоном измерения 100МГц. Для подключения осциллографа к токоподводам пользовались делителями напряжения и делителями тока. Схемы подключения делителей представлены на рис.2.

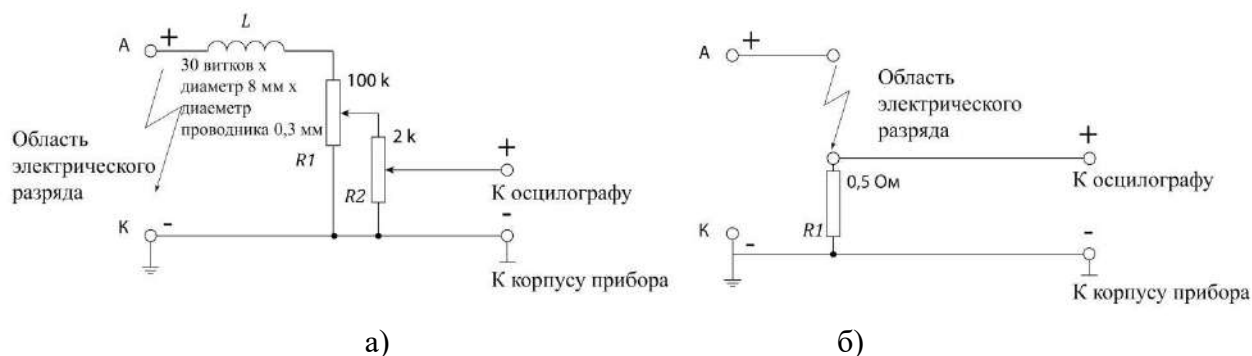


Рисунок 2 – Схема делителей для снятия частотно - импульсных характеристик разряда: а) делитель напряжения; б) делитель тока

Расчетная часть

При анализе разрядных процессов были выполнены расчеты силы тока единичного импульса, расчеты мощности единичного импульса и энергии единичных импульсов.

Величину тока единичного импульса $I_{имп.}$ находили по формуле:

$$U_{имп.} = \frac{dI}{dt} * R ; \quad \text{В} \quad (1)$$

где,

R - величина сопротивления измерительной цепи.

$U_{имп.}$ - напряжение единичного импульса;

Мощность единичного импульса рассчитывали по формуле:

$$W_{имп.} = \frac{dI}{dt} * U_{имп.}; \quad \text{Вт} \quad (2)$$

где,

$\frac{dI}{dt}$ - ток единичного импульса;

Расчет энергии единичных импульсов проводили по формуле:

$$Q_{имп.} = \frac{dI}{dt} * U_{имп.} * t_{имп.}; \quad \text{Дж.} \quad (3)$$

где,

$t_{имп.}$ - время единичного импульса.

Данные по напряжению, току, длительности импульса снимали с осциллограмм.

Результаты эксперимента

В результате выполнения экспериментов были получены осциллограммы отражающие динамику изменения частотно-импульсных характеристик электрического разряда.

Анализ импульсов осциллограмм показывает, что их форма и величина не подчиняются периодическому закону (рис.3., а). Отрицательное значение осциллограммы характеризует индуктивную составляющую измерительной цепи. Рассмотрение осциллограммы с шагом развертки 800 нс показал, что указанный диапазон входит от 8-9 единичных импульсов. Максимальное значение напряжения единичного импульса можно оценить 300-400 мВ (рис.3.б).

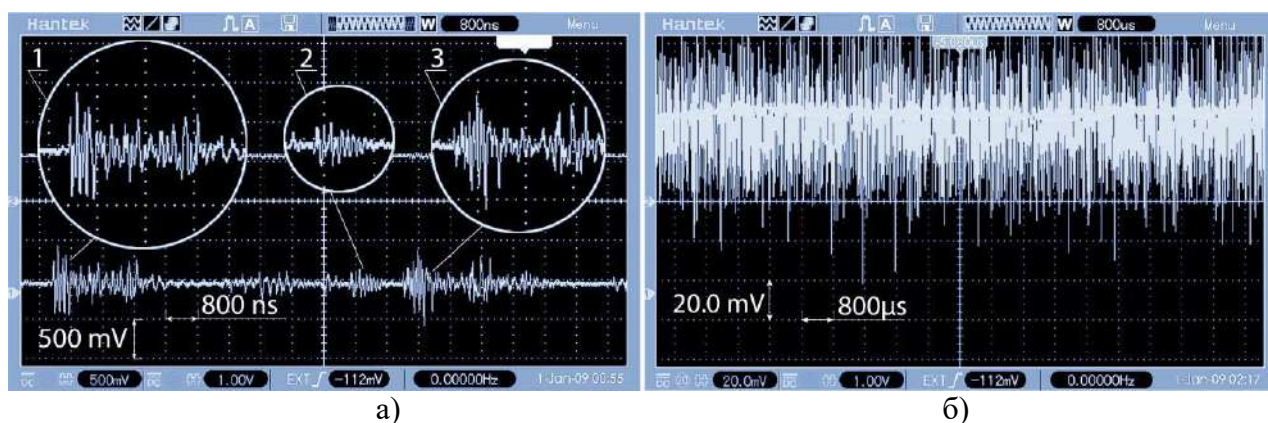


Рисунок 3 – Осциллограммы электролитно - плазменного разряда:

- а) разряд в виде усеченного эллипсоида ($Gv = 1-6$ л/ч); б) разряд в виде струи электролита ($Gv = 8-90$ л/ч).

Авторы работы [10] рассматривают длительность импульсов от 0,45 до 5,00 мс. Снижение амплитуды импульсов оценивают как электрохимическую составляющую, а пиковые значения импульсов как электролитно-плазменную “стадию” процесса полирования.

Таблица 1 – Исходные, полученные и расчетные данные

Исходные данные		Выходные данные		Расчетные данные		
$U_{раб.},$ В	$I_{раб.},$ А	$t_{имп.},$ нс	$U_{имп.},$ В	$I_{имп.},$ А	$W_{имп.},$ Вт	$Q_{имп.},$ Дж
225	0.8-5.6	9-80	300-400	0.14-0.80	0.01-0.32	$1 \cdot 10^{-3}$ - $1 \cdot 10^{-4}$ Дж

Полученные для наших условий значения длительности импульсов в 100-1000 раз меньше.

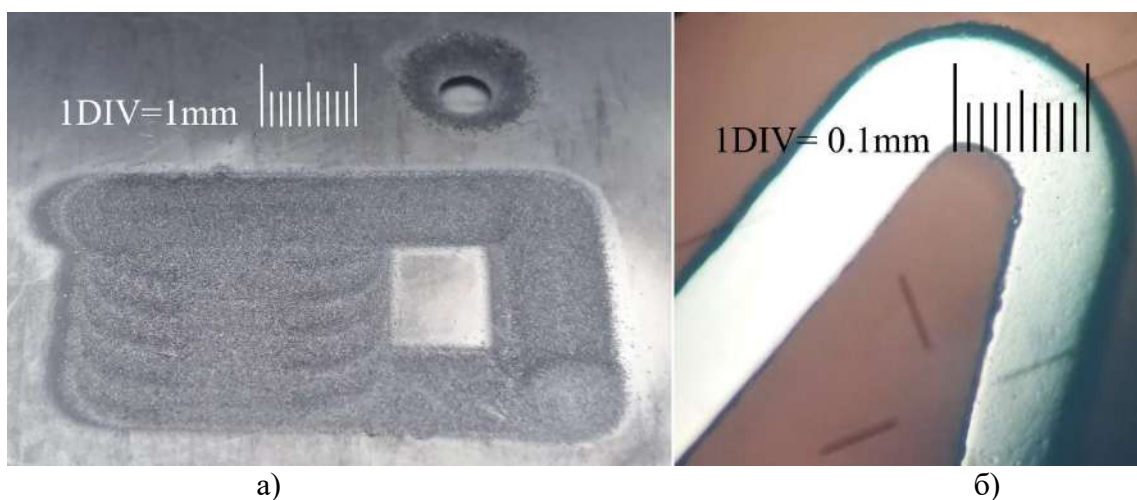


Рисунок 4 – Результаты обработки электролитно - плазменным разрядом:
 а) размерная обработка полым катодом при $Gv = 28$ л/ч;
 б) финишная обработка кардиохирургического стента при $Gv = 2 - 4$ л/ч.

Обсуждение результатов

В результате проведения опытов можно сделать следующие выводы. При низких объемных расходах и комнатной начальной температуре электролита создаются условия образования парогазовой оболочки и слоя электролитно плазменно разряда обладающего высокой проводимостью. Чем ниже скорость потока электролита тем сильнее нагревается локальная область электрического разряда. При дополнительном нагреве электролита (до 70°C) достаточно легко создаются условия полного испарения электролитного потока, за счет выделяемой энергии разряда. Это соответствует режим близкий к капельному ($Gv = 1-2$ л/ч). При высоких скоростях электролита и комнатных температурах поступающего внутрь трубки потока электролита наблюдаются высокие скорости удельного съема материала анода (при $Gv = 6-28$ л/ч). Еще более высокие скорости удельного съема наблюдаются при $Gv = 28-90$ л/ч. Однако с увеличением объемного расхода уменьшается объем и толщина электролитно - плазменного слоя. Если в случае малых расходов электролита электрический разряд переходит в объемный диффузный разряд и занимает до 80-95% от всего объема электрического разряда, то для $Gv = 28$ л/ч объемный диффузный разряд визуально фиксируется при дневном свете только при касании обрабатываемого образца при автоматической подаче. При $Gv = 28-90$ л/ч электролитно-плазменную составляющую можно заметить только при малых подачах движения токоподвода, малых (менее 3 мм) межэлектродных зазоров или дополнительным введением в струю электролита проводников. Наиболее характерно частотно-импульсные характеристики проявляются при низких объемных расходах $Gv = 1-6$ л/ч. При объемном диффузном разряде хлорида натрия длительность единичного импульса исходя из данных осциллографирования составляет 9-80 нс. На рассматриваемых участках осциллограммы частоту разряда с долей допущений можно условно отнести к диапазону 6.2-8.8 МГц. Максимальное значение тока в импульсе наблюдается при разряде в форме усеченного с двух сторон эллипсоида ($Gv = 1-6$ л/ч). В импульсе значения тока могут достигать значений до 0.8 А. В случае увеличения объемного расхода электролита ($Gv = 28-90$ л/ч) максимальные значения тока в импульсе снижаются до 0.14 А.

Поэтому морфология поверхности металлических образцов в значительной степени зависит от объемного расхода электролита. Финишная поверхность с наименьшим параметром шероховатости $Ra \leq 0.2$ мкм формируется при разрядах наносекундной длительности импульса и малых энергий единичного разряда $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-4}$ Дж и частоте мегагерцового диапазона. Получистовая поверхность формируемая при больших объемных расходах электролита ($Gv = 28-90$ л/ч) соответствует $Ra \geq 1.25$ мкм.

Выводы

1. Различные требования к шероховатости поверхностного слоя при разных исходных параметрах шероховатости поверхности требует разных технологических подходов для удаления с поверхности изделия нанослоев или объемов материала.
2. Частотно-импульсные характеристики электролитно-плазменного разряда позволяют точнее зафиксировать параметры технологического процесса и воспроизвести их с высокой повторяемостью.
3. Получены минимальные значения длительности импульса 9-80 нс соответствующие технологическому процессу финишной размерной обработки изделия.
4. Расчет энергии единичного разряда на основе полученных данных по длительности импульса составил $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-4}$ Дж.
5. Предложенные технологические решения позволяют рассматривать данный вид обработки для замены операций ручного шлифования и полирования при производстве турбинных лопаток.

Благодарность

Авторы выражают признательность графическому дизайнеру Поповой Д. А. за подготовку иллюстраций.

Список литературы

1. Попова А.И. Основные факторы инновационно технологического развития В сборнике: Интеграция экономики в систему мирохозяйственных связей. Сборник научных трудов XVII Международной научно-практической конференции. 2012. С. 123-125.
2. Л. А. Ушомирская, А. П. Веселовский, А. П. Головицкий, С.Е. Куминов // Особенности развития электрического разряда при электролитно-плазменом полировании // Металлообработка. 2006. № 4. С. 13-15.
3. Куликов И.С. Основные особенности и перспективы применения технологии электролитно-плазменной обработки материалов // Современные проблемы железнодорожного транспорта: сборник трудов по результатам международной интернет-конференции. - 2 том., ред. К.А. Сергеев, 2019. - с. 8-14.
4. Словецкий Д. И., Терентьев С. Д., Плеханов В. Г. Механизм плазменно-электролитного нагрева металлов // ТВТ. 1986. Т.24. № 2.С. 353.
5. Witzke M., Rumbach P., Go D. B., Sankaran R. M. Evidence for the electrolysis of water by atmospheric-pressure plasmas formed at the surface of aqueous solutions // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45. P. 5.
6. Nestler K., Böttger-Hiller F., Adamitzki W., Glowa G., Zeidler H., and Schubert A. // Plasma Electrolytic Polishing - An Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range // Procedia CIRP. 2016. V. 42. P. 503-507.

7. Алексеев Ю.Г., Королев А.Ю. Паршутто А.Э. Нисс В.С. Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля // Наука и техника. 2017. Т.16, №5. С391.
8. Zakharov, S.V., Korotkikh, M.T. Electrolyte-Plasma Polishing Ionization Model 2020 Lecture Notes in Mechanical Engineering с. 193-208.
9. Danilov, I., Paul, R., Hackert-Oschätzchen, M., Zinecker, M., Quitzke, S., Schubert, A. Random sequential simulation of the resulting surface roughness in plasma electrolytic polishing of stainless steel Procedia CIRP Volume 95, 2020, Pages 981-986 20th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, ISEM 2020; Zurich, Online; Switzerland; 19 January 2021 до 21 January 2021.
10. Электролитно-плазменная обработка в управляемых импульсных режимах / А. Ю. Королёв [и др.] // Наука и техника. 2021. Т. 20, No 4. С. 279–286. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286>.
11. Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. Электрические разряды в парогазовой среде с нетрадиционными электродами // “Энциклопедия низкотемпературной плазмы” / Под ред. Фортова В.Е. М.: Наука, 2000.С. 241.
12. Bagautdinova, L.N., Gaisin, F.M. A multichannel discharge in conducting liquid at atmospheric pressure. *High Temp* 48, 126–128 (2010). <https://doi.org/10.1134/S0018151X10010153>.
13. Ал.Ф. Гайсин, Р.Ш. Басыров, Э.Е. Сон, “Модель тлеющего разряда между электролитическим анодом и металлическим катодом”, ТВТ, 53:2 (2015), 193–197.
14. Галимзянов И. И., Гайсин Ал.Ф., Фахрутдинова И.Т., Шакирова Э.Ф., Ахатов М.Ф., Каюмов Р.Р.// Некоторые особенности развития электрического разряда между струйным анодом и жидким катодом ТВТ . 2018. Т.56. №2. С306.
15. Popov A.I., Popova A.I., Popova D.A., Process aspects of jet electrolytic plasma processing, St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology, 25 (4 2019).
16. Ablyaz, T.R., Muratov, K.R., Ushomirskaya, L.A., Zarubin, D.A., Sidhu, S.S. Electrolytic plasma polishing technique for improved surface finish of ed machined components 2019 Engineering Solid Mechanics 7(2), с. 131-136.
17. Popov, A.I., Novikov, V.I. & Radkevich, M.M. Characteristics of the Development of Electric Discharge between the Jet Electrolyte Cathode and the Metal Anode at Atmospheric Pressure. *High Temp* 57, 447–457 (2019). <https://doi.org/10.1134/S0018151X19030118>.
18. Popov A.I., Radkevich M.M., Teplukhin V.G. Thinnest finishing treatment with a focused jet of electrolytic plasma. Lecture Notes in Mechanical Engineering (см. в книгах). 2020. С. 139-149.
19. V. N. Duradji, D. E. Kaputkin Metal Surface Treatment in Electrolyte Plasma during Anodic Process January 2016 Journal of The Electrochemical Society 163(3):E43-E48 DOI:10.1149/2.0011603jes
20. J. Martin, A.V. Nominé, J. Stef, A. Nominé, J.X. Zou, G. Henrion, T. Grosdidier, The influence of metallurgical state of substrate on the efficiency of plasma electrolytic oxidation (PEO) process on magnesium alloy, Materials & Design, Volume 178, 2019, 107859, ISSN 0264-1275, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107859>.
21. Попов А.И., Радкевич М.М., Кудрявцев В.Н., Захаров С.В., Кузьмичев И.С. Установка для электролитно-плазменной обработки турбинных лопаток. Патент на изобретение РФ № 2623555. Кл. МПК: С25F7/00. 27.06.2017.

**PULSE FREQUENCY DIAGNOSTICS
JET ELECTROLYTIC-PLASMA DISCHARGE**

Popov A.I., candidate of technical sciences, associate professor,
e-mail: popov_ai@spbstu.ru

Veselovsky A.P., candidate of technical sciences, associate professor,
e-mail: a_veselovskiy@mail.ru

Ermak S.V., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
e-mail: serge_ermak@mail.ru

Johannes Lazarev, student, e-mail: lazarevyohannes@gmail.com

Zakharov S.V., postgraduate student, e-mail: t80448@mail.com

Radkevich M.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: radkevich_mm@spbstu.ru

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
194064, Polytechnicheskaya street, 29, St. Petersburg, Russian Federation,

Abstract

This article shows the results of a study on the diagnosis of an electrolyte jet plasma formed in a supersaturated sodium chloride solution between the anode and the hollow cathode at atmospheric pressure, room temperature, electrolyte volumetric flow rates from 2 to 90 l / h, and an inner diameter of the hollow cathode of 3 mm. The frequency-pulse characteristics of the discharge are considered at different volumetric flow rates of the electrolyte. It is shown that the minimum duration of a single pulse corresponds to the range of 9-80 ns. Changing the volumetric flow rate of the electrolyte allows you to control the frequency-pulse characteristics of the discharge and select the required technological mode for processing products. It is shown that the technological application of an electrolyte-plasma discharge with the use of automation means can be used for both finishing and dimensional processing of complex curved surfaces, such as turbine blades, blisks, impellers.

Keywords: anode, cathode, electrolyte plasma, oscillogram, finishing, rough processing, pulse duration, turbine blades.

УДК 621.78

МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ СТРУЙНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

*ПОПОВ Александр Иннокентьевич, к.т.н., доцент,
e-mail: popov_ai@spbstu.ru*

*РАДКЕВИЧ Михаил Михайлович, доктор техн. наук, профессор,
e-mail: radkevich_mm@spbstu.ru*

*ФУМИН Александр Сергеевич, магистр,
e-mail: vosxondav@mail.ru*

*СИНЮКОВ Леонид Сергеевич, студент,
e-mail: leo-sinyukov@yandex.ru*

*АЛХЕНДИ Яхья Мустафа Абедалкадер, студент,
e-mail: alhindi.yahia@yahoo.com*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Российская Федерация, 194064, Санкт-Петербург, Политехническая улица, 29

Аннотация

В этой статье предложена методология выбора и конструирования электрод-инструментов для электролитно-плазменной обработки: грубой ($R_{max} \geq 0.5$ мм), получистовой ($R_{max} \geq 0.2$ мм), финишной ($R_{max} \geq 0.01$ мм). Рассмотрены условия обработки поверхности широком диапазоне глубин съема свыше 0.5 мм, диапазоне напряжений 20-500 В, и объемных расходах электролита $Gv = 1-90$ л/ч. На основе предложенного алгоритма произведено численное моделирование для грубой обработки в программе SolidWorks. На основе моделирования и расчетов изготовлен и опробирован электрод инструменты типа “гармошка” и “игла”. Показано, что предложенный алгоритм выбора условий и конструирования электродов инструментов показывает удовлетворительные результаты. Электрод-инструмент типа “гармошка” позволяет снять за один проход 90-150 мкм. Полученные результаты предполагают использование данного алгоритма при конструировании электрод-инструментов для обработки поверхности после обработки резанием, без использования операций шлифования для обработки сплайновых поверхностей типа турбинных лопаток.

Ключевые слова: методология, принципы конструирования, анод, катод, электролитная плазма, электрод-инструмент, финишная обработка, размерная обработка, скорость съема материала.

Введение

В рамках инновационного развития машиностроения, как отрасли актуальным является уделение внимания методологическим аспектам разработки новейших технологий [1,2]. К числу таких новых технологий можно отнести методы использующие фокусированный поток энергии на поверхность изделия. Преимущество данного подхода заключается в локализации места обработки и создание потоком в локальном месте заготовки высокой концентрации энергии, способной изменить его структуру, объем, свойства материала и поверхности, а за счет сканирования поверхности сделать это на всем изделии. Данные потоки могут относиться к разным видам обработки лазерной, плазменной, гидроабразивной, магнитной,

электронной, электролитно-плазменной [3-11]. Среди данных технологий электролитно-плазменная технология с применением фокусированной струи электролита занимает особое место. Ее технологические возможности позволяют не только формировать в поверхности отверстия,резы, но и производить обработку грубую размерную обработку материала за счет снятия объемов с поверхности и производить финишную обработку поверхности полированием [12-17]. Такими технологическими возможностями обладает только технологический процесс шлифования-полирования. Однако сплайновые поверхности заготовок в большей мере обрабатываются за счет операций ручного шлифования-полирования. Это не может обеспечить требуемые параметры точности размеров и шероховатости поверхности за счет влияния человеческого фактора. Поэтому внедрение в промышленность новых методов, как-им является струйная фокусированная электролитно-плазменная обработка открывает новые технологические возможности. Это обеспечивается низкой температурой обработки, грубой начальной шероховатостью поверхности Rz 80 и низким параметром финишной обработки Ra 0.034, экологической чистотой процесса и низким энергопотреблением 1-5 кВт [18-21]. К тому же данный метод достаточно легко поддается автоматизации. Поэтому данная технология является очень перспективной, особенно для обработки сплайновых поверхностей. Однако ввиду новизны метода и недостатка информации по отдельным технологическим особенностям отсутствует общая методология выбора условий обработки и принципов конструирования электродов-инструментов для данного технологического процесса. В литературе имеются отдельные работы посвященные электрохимическим методам обработки [22], но они не охватывают электролитно плазменные методы. Цель нашей работы разработать общие методологические подходы к области технологического применения, выбору электродов-инструментов и разработке их конструкции для электролитно-плазменной обработки.

Материалы и оборудование

Эксперименты проводились на экспериментальной установке, разработанной в Высшей школе машиностроения СПбПУ. Принцип ее работы подробно описан в работах авторов [14,15]. Для проведения экспериментов выбраны разработанные нами электрод-инструменты показавшие в процессе проведения экспериментов наибольшую эффективность. К данным инструментам относятся наборный токоподвод, медная трубка \varnothing 3 мм выполняющая роль полового катода и магнетронная распылительная головка [20,21]. При применении данных электрод-инструментов использовался экологически чистый электролит на основе хлорида натрия с концентрацией от 3 г/л до полного насыщения раствора. Электролит подавался через электрод-инструмент с объемным расходом от $Gv = 1-90$ л/ч. Высота межэлектродного зазора соответствовала от $h = 2-30$ мм. Роль анода выполняли образцы их сталей 20X13, 08X18N9T. Рабочий диапазон напряжений составил от 20-500 В.

Методология выбора технологии и конструирования электрод –инструментов

Эксперименты проведенные нами в области струйной электролитно-плазменной обработки металлических поверхностей из разных конструкционных материалов позволили формализовать процесс выбора технологических условий и методики конструирования электрод-инструментов. Основную массу экспериментов можно условно разделить на три основные группы, технология направленная на получение финишной поверхности, технология направленная на обработку грубой поверхности, и технология направленная на получение получистовой обработки. Каждый вид технологической обработки возможен при применении

одного или двух электродов- инструментов. Основные схемы взаимодействия электрод-инструментов с поверхностью анода представлены на рис.1. На данных схемах рассмотрена скорость потока электролита V_{1-3} , направление потока и форма потока на поверхности, напряженность электрического поля E в зоне разряда и вектора магнитной индукции \vec{B} . Каждой схеме соответствует своя технология обработки поверхности и свое комбинирование электрохимических и электрофизических механизмов.

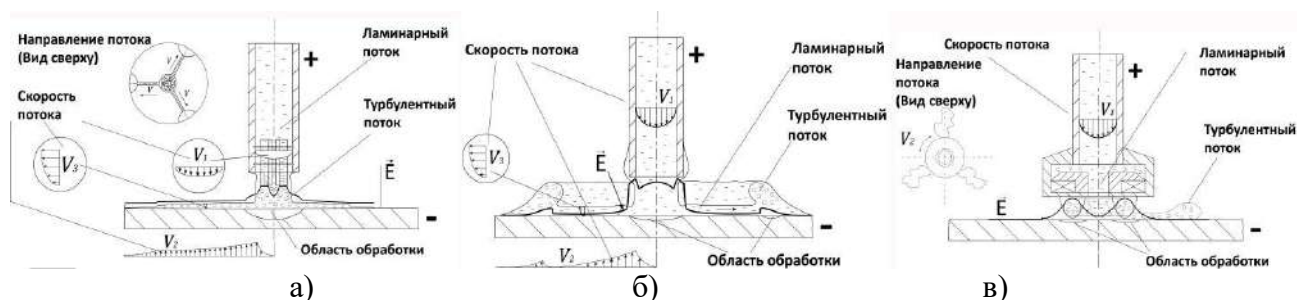


Рисунок 1 – Основные схемы формирования электролитического разряда с разными видами токоподводов : а) - с наборным; б) - с полым катодом; в) - с магнетронной распылительной головкой

Наилучшее качество поверхности достигается при малых расходах электролита ($Gv = 1-6$ л/ч) при применении электрического разряда в форме усеченного эллипсоида или магнетронного кольца (Рис.1. б, в.) [15, 20]. Основной механизм воздействия на поверхность электролитно-плазменный, электрохимический механизм носит вспомогательный характер.

Вторым ярко выраженным экстремумом удельного съема материала является обработка поверхности с применением наборного токоподвода ($Gv = 28-90$ л/ч). В этом случае значительное увеличение объемного расхода и введение в струю электролита набора проводников вносит существенные изменения в скорость снятия материала анода. Рост тока при этом пропорционален числу проводников. Это объясняется преобладанием электрохимического механизма над электролитно-плазменным. Промежуточный результат по скорости удельного съема достигается при использовании полого катода ($Gv = 8-28$ л/ч). Увеличением объемного расхода электролита не удастся значительно увеличить плотность тока на поверхности. Это возможно только за счет уменьшения межэлектродного зазора. Однако при это велика вероятность электрического пробоя и разрушения поверхности. Для полого катода характерным является конкурирующее воздействие на поверхность двух механизмов электрохимического и электролитно-плазменного.

На основе полученных данных для оценки выбора технологических условий, при которых возможна обработка поверхности с начального уровня шероховатости до заданного нами предложена методология выбора технологии обработки и конструирования электрод-инструментов (Рис.2.). На основе предложенной методологии было разработано устройство для размерной обработки материалов на основе компьютерного моделирования в программе SolidWorks. Данное устройство токоподвода, по форме выполненное в виде “гармошки” представлено на рис.3.

Результаты экспериментов

На основе данного алгоритма были изготовлены несколько токоподводов: полый токоподвод с острым краем диаметром 1.5 мм (конструкция предложена Алхенди Яхья) токо-

подвод в виде “гармошки” (конструкция предложена Синюковым Л.С.). Оба электрод-инструмента были выполнены из материала Л69. Результаты испытаний показали, что максимальный ток разряда 11.5А возникает при близком до 3-5 мм подводе плоского среза токоподвода в виде “гармошки”.

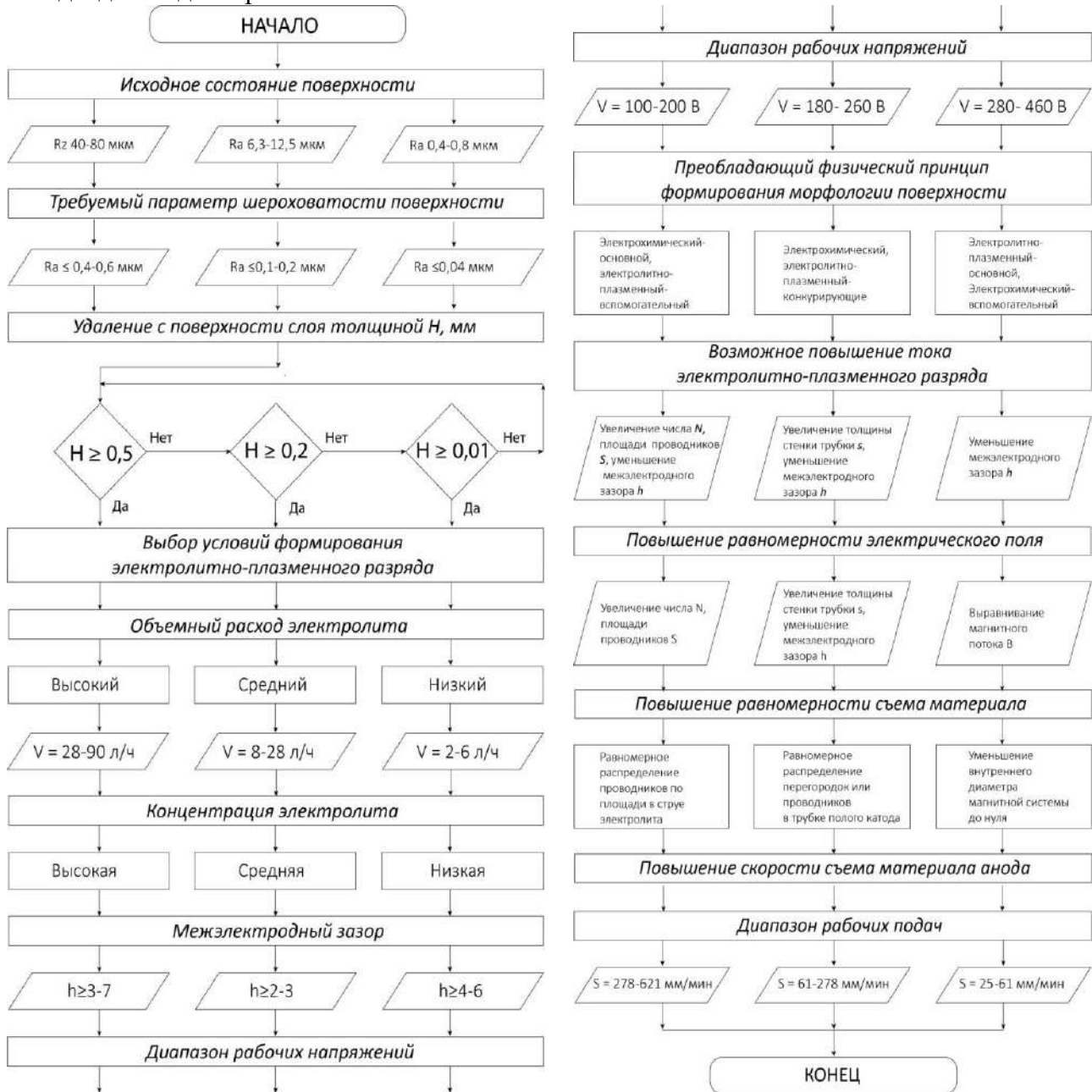


Рисунок 2 – Блок - схема алгоритма выбора технологического применения и конструирования электрод-инструментов для электролитно-плазменной обработки

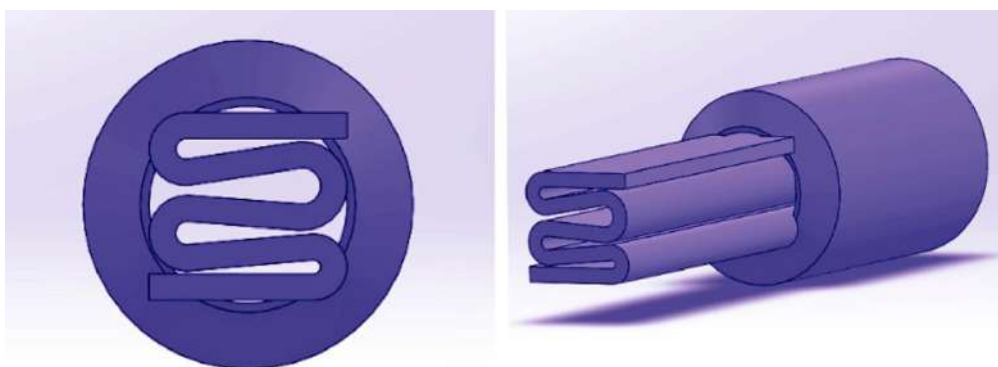


Рисунок 3 – Токоподвод для размерной обработки поверхности металлов в виде “гармошки” для работы при ($Gv = 28-90$ л/ч)

Для полого токоподвода с острым концом в процессе обработки формируется большое количество стекающих с острия разрядов. Максимальный ток для полого токоподвода с острым концом не более 1.8 А. В итоге через несколько проходов на остром конце электрода формируется оплавление в виде капли.

При использовании токоподвода в виде “гармошки” при его неподвижном состоянии формируется гладкая блестящая поверхность. Отмечено, что в местах максимального раскрытия инструмента на поверхности формируется обратный “шип”. При движении этого электрод-инструмента наблюдается небольшая рябь на поверхности, которую можно отнести к дискретности рабочего хода привода шагового двигателя. Для данного инструмента получен удовлетворительный результат по удалению дефектных слоев с поверхности анода - образца после пиления ленточной пилой. Глубина съема материала при этом составила 470 мкм за три рабочих прохода.

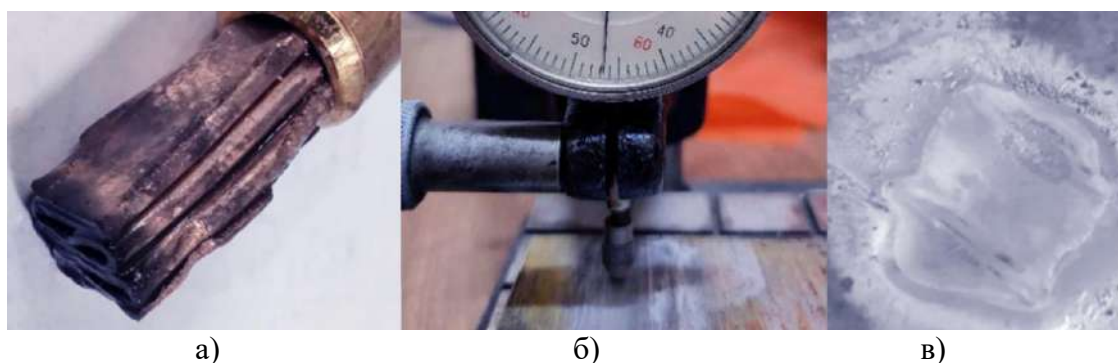


Рисунок 4 – Внешний вид электрода-инструмента и поверхности после электролитно - плазменной обработки: а) электрод инструмент типа гармошка; б) образец из стали 08X18H9T ($Gv = 28$ л/ч); в) образец из стали 20X13 после пиления, удаление с поверхности 470 мкм за три прохода ($Gv = 28$ л/ч, $S=278$ мм/мин)

Обсуждение результатов

В результате выполненной работы можно сделать следующие выводы. Разработанный алгоритм выбора электродов-инструментов для заданных условий обработки материалов соответствует поставленным задачам. Данный алгоритм учитывает основные начальные фак-

торы уже сформированной предыдущими технологическими операциями поверхности. Это позволяет выбрать тот метод обработки, при котором формируется максимальная эффективность процесса формирования морфологии поверхностного слоя. Алгоритм учитывает основные параметры процесса электролитно-плазменной обработки, такие как объемный расход электролита, межэлектродный зазор, концентрацию электролита, диапазон рабочих напряжений, токов и скоростей подачи токоподвода. Для конструирования электрод-инструментов данный алгоритм учитывает межэлектродный зазор, площадь поверхности токоподвода, заполнение поверхности торцевого среза проводящим материалом и потоком электролита, условия равномерности формирования напряженности электрического поля и магнитного потока, и равномерность съема материала анода. Сконструированные на базе данной методологии рабочие электрод-инструменты показали высокие скорости съема материала. Полученные результаты работы позволяют надеяться на успешное применение данной методологии для разработки промышленных электрод-инструментов для обработки таких сложных поверхностей как профили турбинных лопаток. Это позволит в перспективе полностью удалить операции ручного шлифования и полирования.

Выводы

1. Предложена методология выбора технологического применения и конструирования электрод-инструментов для электролитно-плазменной обработки.
2. Выполнено компьютерное моделирование электрод-инструмента типа “гармошка” и “игла” применяемых для черновой и получистовой обработки поверхности проводящих конструкционных материалов.
3. Получены удовлетворительные результаты на образцах после пиления при глубине съема до 470 мкм за три прохода при подаче токоподвода 278 мм/мин.
4. Предложенная методология позволяет производить выбор условий технологических решений для основных параметров черновой, получистовой и финишной обработки.
5. Данное решение позволяет рассматривать данную методологию для технологического применения при замене операций ручного шлифования и полирования в условиях производства турбинных лопаток.

Благодарность

Авторы выражают признательность графическому дизайнеру Поповой Диане за подготовку иллюстраций.

Список литературы

1. Принципы построения автоматизированных систем поддержки жизненного цикла инновационных продуктов / А. И. Надеев, А. И. Попова, А. В. Сурина, Ю. К. Свечников // Датчики и системы. 2006. № 11 (90). С. 59-63.
2. Попова А. И. Северо-западный регион в системе мирохозяйственных связей. Интеграция экономики в систему мирохозяйственных связей // Сборник научных трудов XVII Международной научно-практической конференции. 2012. С. 100-102.
3. Murashov, I., Frolov, V., Korotkikh, M., Ushomirskaya, L. *Numerical simulation of DC air plasma torch modes and plasma jet instability for thermal spraying technology* (Открытый доступ) (2018) *MATEC Web of Conferences*, 245, art. no. 04003. doi: 10.1051/mateconf/201824504003.
4. Korotkikh, M.T., Radkevich, M.M., Kryazhev, D.Y. Hole Production in High-Strength Steels by Plasma Incision and Reaming *Russian Engineering Research*, 2019, 39(1), стр. 37–40.

5. Korotkikh, M., Ushomirskaya, L., Shestakov, V., Ivanov, D. Technological possibilities of plasma hardening MATEC Web of Conferences, 2018, 245, 04005.
6. Baron, Yuri M. (2016). Magnetic abrasive deburring technology for blanks. International Journal of Engineering Research in Africa, 25, 1–10.
7. Ushomirskaya, L.A., Baron, Y.M., Kuzmichev, I.S. Design of special device for the forced electrolytic-plasma polishing of internal surfaces by counter flows Key Engineering Materials Том 822, Страницы 610 – 616 2019.
8. Danilov, I., Paul, R., Hackert-Oschätzchen, M., (...), Quitzke, S., Schubert, A. Random sequential simulation of the resulting surface roughness in plasma electrolytic polishing of stainless steel 2020 Procedia CIRP 95, с. 981-986.
9. Quitzke, S., Martin, A., Schubert, A. Localized surface functionalization of steel by jet-plasma electrolytic polishing Proceedings of the 20th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, EUSPEN 2020 с. 133-136.
10. Quitzke, S., Martin, A., Schubert, A. Influence of ignition and polishing phase on jet shape and electric current in Jet-Plasma electrolytic polishing Proceedings of the 21st International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, EUSPEN 2021, 2021, стр. 165–168.
11. Radkevich, M.M., Kuzmichev, I.S.: Technological principles of internal surfaces finishing by forced electrolytic-plasma polishing. In: Key Engineering Materials, vol. 822, pp. 634–639. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.822.634>. ISSN 1662-9795.
12. Kuzmichev, I.S., Ushomirskaya, L.A., Shmelkov, A.V., Sysoev, I.A.: Linear, inner, lengthy surfaces finishing using the forced-flow electrolyte-plasma process for metal products. Nauchno-proizvodstvennii jurnal “Metalloobrabotka”. AO «Izdatel'stvo “Politehnika”». №3 (99)/2017. – 70 str. (rus.). ISSN 1684-6702.
13. Zakharov, S.V., Korotkikh, M.T. Electrolyte-Plasma Polishing Ionization Model 2020 Lecture Notes in Mechanical Engineering с. 193-208.
14. Popov A.I., Radkevich M.M., Teplukhin V.G. Thinnest finishing treatment with a focused jet of electrolytic plasma. Lecture Notes in Mechanical Engineering (см. в книгах). 2020. С. 139-149.
15. Popov, A.I., Novikov, V.I. & Radkevich, M.M. Characteristics of the Development of Electric Discharge between the Jet Electrolyte Cathode and the Metal Anode at Atmospheric Pressure. *High Temp* 57, 447–457 (2019). <https://doi.org/10.1134/S0018151X19030118>.
16. Witzke M., Rumbach P., Go D. B., Sankaran R. M. Evidence for the electrolysis of water by atmospheric-pressure plasmas formed at the surface of aqueous solutions // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45. P. 5.
17. Nestler K., Böttger-Hiller F., Adamitzki W., Glowa G., Zeidler H., and Schubert A. // Plasma Electrolytic Polishing - An Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range // Procedia CIRP. 2016. V. 42. P. 503-507.
18. Ushomirskaya, L.U., Baron, Yu.M., Kuzmichev, I.S.: Design of special device for the forced electrolytic-plasma polishing of internal surfaces by counter flows. In: Key Engineering Materials, vol. 822, pp. 610–616. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.822.610>. ISSN 1662-9795.
19. Ablyaz, T.R., Muratov, K.R., Ushomirskaya, L.A., Zarubin, D.A., Sidhu, S.S. Electrolytic plasma polishing technique for improved surface finish of ed machined components 2019 Engineering Solid Mechanics 7(2), с. 131-136.

20. Попов А.И., Радкевич М.М., Медко В.С., Шиллинг Н.Г., Рудагин А.А. Магнетронная распылительная головка. Патент на изобретение РФ № 2656318. Кл. МПК: С23С14/35. 04.06.2018.

21. Попов А.И., Радкевич М.М., Медко В.С., Новоселов М.В. Устройство для электролитно-плазменной обработки металлических изделий. Патент на изобретение РФ № 2681239. Кл. МПК: С25F7/00. 13.06.2018.

22. Моргунов Ю.А., Панов Д.В., Саушкин Б.П., Саушкин С.Б. Научно-технические технологии машиностроительного производства: физико-химические методы и технологии/ Москва, 2013.

METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF ELECTRODE TOOLS FOR JET ELECTROLYTE-PLASMA TREATMENT

Popov A.I., candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: popov_ai@spbstu.ru

Radkevich M.M., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: radkevich_mm@spbstu.ru

FUMIN Alexander Sergeevich, master, e-mail: vosxondav@mail.ru

SINYUKOV Leonid Sergeevich, student, e-mail: leo-sinyukov@yandex.ru

ALHENDI Yahya Mustafa Abedalkader, student e-mail: alhindi.yahia@yahoo.com

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
194064, Polytechnicheskaya street, 29, St. Petersburg, Russian Federation,

Abstract

This article proposes a methodology for the selection of technology and design of electrode tools for electrolytic-plasma treatment: coarse ($R_{max} \geq 0.5\text{mm}$), semi-finishing ($R_{max} \geq 0.2\text{mm}$), finishing ($R_{max} \geq 0.01\text{mm}$). The conditions of surface treatment are considered for a wide range of removal depths over 0.5 mm, a voltage range of 20-500 V, and electrolyte volumetric flow rates $G_v = 1-90 \text{ l/h}$. On the basis of the proposed algorithm, numerical modeling for rough processing in the SolidWorks software was carried out. On the basis of modeling and calculations, an electrode was manufactured and tested - instruments of the "accordion" and "needle" type. It is shown that this algorithm for choosing the conditions and designing the electrodes of the instruments shows satisfactory results. The results allow the use of this algorithm in the design of electrode tools for operations after cutting, without using grinding operations for machining curved surfaces such as turbine blades.

Keywords: anode, cathode, electrolyte plasma, electrode-tool, finishing, dimensional processing, material removal rate, methodology, design.

УДК 621.9; 519.246.85

ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОМЕРНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

*ЧИГИРИНСКИЙ Юлий Львович, докт. техн. наук, профессор,
e-mail: julio-tchigirinsky@yandex.ru*

*ЧИГИРИНСКАЯ Наталья Вячеславовна, докт. пед. наук, профессор,
e-mail: nvtchi@yandex.ru*

*ЕВТЮНИН Александр Валерьевич
e-mail: techmash@vstu.ru*

Волгоградский государственный технический университет,
400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. В. И. Ленина, 28

Аннотация

Содержание термина «стабильность процесса», определяемое нормативными документами систем управления качеством продукции, в условиях применения адаптивных технологических (киберфизических или цифровых производственных) систем, являющихся основной практической реализации «концепции «Индустрия 4.0», является неоднозначным. На основании экспериментальных данных показано, что количественная оценка стабильности статистически управляемых процессов, может быть выполнена по статистическому критерию Фишера, определяющему уровень адекватности математической модели процесса, либо по абсолютной величине «нулевого» коэффициента регрессии (иначе, «фактора риска») многофакторной регрессионной модели, построенной в нормированном координатном пространстве.

Ключевые слова

Стабильность, механическая обработка, статистическая управляемость, качество, точность, статистическое моделирование, многофакторная модель.

Введение

Реализация концепции «Индустрия 4.0», заявленная в программных документах Национальной Технологической Инициативы» [22, 23], предполагает широкое внедрение цифровых производственных систем в современных механообрабатывающих производствах. Основной целью такой модернизации является интенсификация производства при сохранении, а чаще, при повышении, требований к качеству продукции. Процедуры сертификации производства и проверки СМК предприятия требуют проведения оценки точности, стабильности, настроенности технологических процессов.

Отметим, что в настоящее время не существует однозначного определения «стабильности» применительно к технологическим процессам или отдельным методам механической обработки. Существует несколько терминов, используемых для определения близких по смыслу понятий: точность – «неизменность во времени степени соответствия параметров готового изделия параметрам, заданным на чертеже изделия» [8] или «сохранение параметров выпускаемых изделий в допустимых пределах в процессе изготовления всей партии» [Ошибка! Источник ссылки не найден.5]; стабильность – «свойство технологического процесса, обуславливающее постоянство распределений вероятности его параметров в тече-

ние некоторого интервала времени без вмешательства извне» [7, 8]. Практически все эти трактовки, в той или иной мере, являются перифразом понятия «надежность» [1] – «свойство ... сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции ...».

Дальнейшие рассуждения проведем в отношении точности размеров, получаемых в результате механической обработки, но заметим, что аналогичные выводы могут быть сделаны в отношении любых других показателей качества изделия – макро- и микрогеометрических характеристик обработанных поверхностей, физико-механических характеристик поверхностного слоя и т. д. За основу принимаем гипотезу о стохастической природе процессов механической обработки и, как следствие, о случайном характере числовых величин, определяющих результаты обработки: показателей качества, точности, физико-механических характеристик поверхностного слоя и др.

Понятие «стабильность процессов» в нормативных документах

Традиционные [6, 7, 8. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**6, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**7] подходы к статистическому анализу неизменности во времени значений показателей точности обработки сводятся к расчету среднего значения настроенного размера и стандартного отклонения, как оценки совокупного влияния различных погрешностей. При этом, в качестве аксиомы принимается, что распределение размеров в каждой частной выборке подчиняется закону нормального [8, раздел 3] распределения. Далее нормативные документы [6, 7, 8] рекомендуют оценить, относительно ширины (δ) поля допуска:

$$- \text{выполнение «правила шести сигма» (коэффициент точности)} \quad \frac{6S}{\delta}; \quad (1)$$

$$- \text{смещение среднего значения (коэффициент настроенности)} \quad \frac{(\bar{x} - x^\delta)}{\delta}; \quad (2)$$

$$- \text{постоянство стандартного отклонения (коэффициент стабильности)} \quad \frac{S_{t_1}}{S_{t_2}}; \quad (3)$$

где S, S_{t_1}, S_{t_2} – стандартное отклонение совокупной выборки и частных выборок в определенные моменты времени t_1 и t_2 ;

$\bar{x}, x^\delta, \delta$ – среднее значение, середина поля допуска, ширина поля допуска.

Нормируемые значения для рассчитываемых коэффициентов (1..3) документами системы менеджмента качества не устанавливаются. Как правило, окончательное заключение о стабильности технологии принимается службой технического контроля на основании субъективного мнения специалиста.

В качестве промежуточных выводов отметим:

1. Объективная количественная оценка стабильности процессов механической обработки на основе действующих нормативов является невозможной, поскольку:

- не существует однозначного, закрепленного в нормативных документах, понятия «стабильность» применительно к процессам и технологиям механической обработки;
- в нормативных документах отсутствуют рекомендуемые численные нормы показателей стабильности.

2. Рекомендуемые для оценки стабильности численные характеристики (1..3):

- при проведении статистического анализа все числовые значения считаются случайными, подчиняющимися закону нормального распределения – это следует из (1);
- в условиях современного механообрабатывающего производства критерии оценки стабильности, «построенные» на законе нормального распределения, не приемлемы, по-

скольку в настоящее время в машиностроении преобладающим способом организации является производство мелкосерийное; гипотеза о нормальном законе распределения значений количественных показателей качества обработки в пределах поля допуска корректна только в случае больших объемов статистических совокупностей, т. е., в условиях крупносерийного или массового производства;

– оценка стабильности обработки на оборудовании с адаптивными системами управления приводит к некорректным результатам, поскольку среднее значение любой случайной величины, оценивающей результат процесса обработки, предполагается идемпотентным (2) для каждой технологической операции (перехода) – не учитывается возможность закономерного изменения среднего значения случайной величины.

Оценка стабильности стохастических процессов

Исходя из предположения об условном постоянстве среднего значения, при оценке отдельно взятого технологического перехода, в качестве количественного критерия стабильности можно рассматривать коэффициент вариации (4) – статистическую характеристику, малочувствительную к закону нормального распределения и, вследствие этого, применимую для оценки стабильности (однородности, по У. Шухарту [13]) процесса.

$$V = \frac{S}{x} \quad (4)$$

Таблица 1 – Сравнение понятий «однородность» [13] и «стабильность» процесса

Значения коэффициента вариации	Качественная оценка однородности	Качественная оценка стабильности
$V \leq 0,17$	высокая однородность	процесс стабильный
$0,17 < V \leq 0,33$	удовлетворительная однородность	
$V > 0,33$	неоднородность процесс	процесс нестабильный

Отметим, что оценка нормально распределенных выборочных совокупностей большого объема по коэффициенту вариации показывает хорошую сходимость [Ошибка! Источник ссылки не найден.7] с общепринятыми критериями стабильности – при $V \leq 0,33$ интегральная вероятность, рассчитанная для нормального распределения, $\Phi \geq 0,9973$, что соответствует стабильному процессу.

Оценка стабильности частично детерминированных процессов по величине статистического критерия Фишера

На практике процессы механической обработки следует рассматривать, как частично детерминированные (рис. 1), поскольку любой количественно оцениваемый результат формируется не только (и не столько) под влиянием случайных факторов, но, в первую очередь, за счет физически обоснованных закономерных воздействий.

Для частично детерминированных процессов традиционный подход к оценке стабильности не позволяет получать корректные результаты. В этом случае нужно следовать рекомендациям [6], в соответствии с которыми стабильным называют «процесс, каждый показатель качества которого находится в состоянии статистической управляемости». Понятие «статистическая управляемость», применительно к процессам механической обработки, рассматривается нами в оригинальной трактовке У. Шухарта [13] и Э. Деминга [14]: «Если про-

цесс находится в статистически управляемом состоянии, то известно, как он будет себя вести в дальнейшем», т. е., существует функциональная зависимость между количественной оценкой результата процесса и количественными оценками технологических факторов, обуславливающих этот результат.

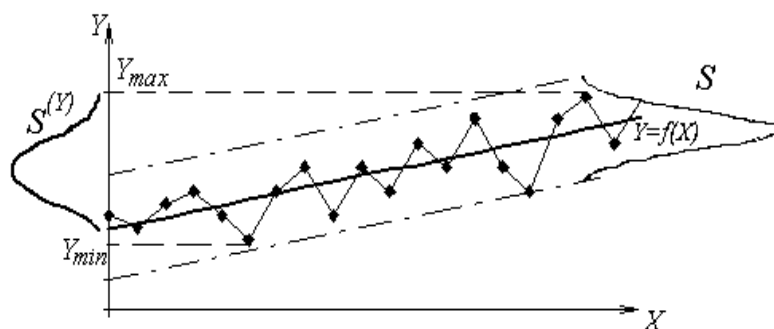


Рисунок 1 – Частично детерминированный процесс

В качестве показателей качества процесса (рис. 1) рассматриваются не только статические характеристики (среднее значение, стандартное отклонение $S(Y)$ по выборочной совокупности), но и «динамические» (закономерно – $Y = f(x)$, – изменяющееся среднее, стандартная ошибка модели S) [Ошибка! Источник ссылки не найден.8]. Количественной оценкой стабильности, в этом случае, можно считать, например, критерий Фишера [Ошибка! Источник ссылки не найден.8, 16].

$$F = \frac{S^{(Y)}}{S}; \quad F \geq 1. \quad (5)$$

Покажем возможность оценки стабильности по критерию Фишера. Выборочная совокупность из 120 значений получена при измерении в шести сечениях 20 деталей, обработанных за период стойкости инструмента. Стандартное отклонение выборки составило $S^{(Y)} = 0,017 \text{ mm}$ при заданной ширине поля допуска. Коэффициент точности (1) рассчитанный из предположения о стохастичности процесса обработки и нормальном законе распределения случайных воздействий, равный $6 \cdot 0,017 / 0,062 = 1,64 \geq 1$, показывает, что процесс обработки является нестабильным. Если учесть частичную детерминированность процесса, то закономерное изменение значения результата обработки (размер изделия) можно описать, например, степенной регрессионной зависимостью (6) вида:

$$d = d_0 + a \cdot n^b, \quad (6)$$

где d – ожидаемое значение размера n -й детали, d_0 – номинальное значение размера, a , b – коэффициенты регрессии [7]. В рассматриваемом случае $d = 42 + 0,08 \cdot n^{-0,11}$. Стандартная ошибка модели, с учетом выделенной закономерности, составила $S = 0,007 \text{ mm}$. Коэффициент точности (1), рассчитанный по величине стандартной ошибки модели, составляет

$6 \cdot 0,007 / 0,062 = 0,68 \leq 1$, что говорит о достаточной стабильности процесса. Величина критерия Фишера (5) для описанного процесса $F = \left(0,017 / 0,007\right)^2 = 5,897 \gg 1$, что позволяет, с вероятностью близкой к 100 %, утверждать, что процесс обработки находится в состоянии «статистической управляемости» [6] и является стабильным.

Оценка стабильности частично детерминированного процесса по абсолютному значению «фактора риска» многофакторной модели процесса

Для более сложных процессов, результаты которых зависят от комплекса технологических факторов, количественная оценка стабильности процесса должна учитывать вариативность нескольких попарно независимых случайных величин, составляющих структуру статистической модели, записываемой в виде функции нескольких переменных (табл. 2).

Таблица 2 – Нормирование статистических моделей различных спецификаций

Спецификация исходной модели	Нормирование		Спецификация нормированной модели
	функции	аргументов (факторов)	
$R = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j \cdot \Phi_j$	линейные нормирующие преобразования		$Y = \sum_{j=0}^n A_j \cdot X_j;$ $X_0 \equiv 1$
$R = a_0 \cdot \prod_{j=1}^n \Phi_j^{a_j}$	логарифмические нормирующие преобразования		
$R = a_0 \cdot \prod_{j=1}^n a_j \cdot \Phi_j$	логарифмическое	линейное	
	нормирующие преобразования		

Рассмотрим возможность оценки стабильности сложного процесса по его многофакторной модели на примере процесса формирования микропрофиля при токарной обработке наружной цилиндрической поверхности. Экспериментальные исследования по методике полнофакторного планирования 3^4 проведены при чистовом точении заготовок из коррозионностойкой стали 20Х13. Глубина резания $t = const$ (0,5 mm), геометрия режущего клина постоянна при всех опытах. Результат процесса оценивается по величине среднеарифметического отклонения высоты микронеровностей Ra (Y). Варьируемые факторы процесса: твердость поверхности заготовки $HB = 160...240$ (X_1); коэффициент теплопроводности инструментального материала $\lambda \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right] = 11$ (ТН20), 27 (Т15К6), 50 (ВК6) (X_2); скорость подачи $S \left[\frac{мм}{об} \right] = 0,083...0,256$ (X_3); скорость резания $V \left[\frac{м}{мин} \right] = 90...180$ (X_4). Построена степенная модель (7), в нормированном (табл. 2) координатном пространстве эксперимента имеющая вид (8). Стандартное отклонение статистической выборки значений Ra : $\sigma = 0,504$ мкм, $\overline{Ra} = 1,91$ мкм.

$$Ra = 12,34 \cdot V^{0,12} \cdot \lambda^{0,17} \cdot S^{0,37} \cdot HB^{-0,43}; \quad (7)$$

$$Y = -0,016 \cdot X_0 + 0,084 \cdot X_1 + 0,224 \cdot X_2 + 0,388 \cdot X_3 - 0,207 \cdot X_4. \quad (8)$$

Оценим (табл. 3) стабильность процесса рассмотренными ранее (2.1 ... 2.3) способами.

Таблица 3 – Сравнительная оценка стабильности процесса

Метод оценки	Количественная оценка стабильности	Качественная оценка стабильности
правило «шести сигма»(1)	$6 \cdot 0,504 = 3,024 \text{ мкм}$	оценить невозможно – не задана величина δ
коэффициент вариации(4)	$V = 0,504 / 1,91 = 0,26; P(V) = 0,998$	стабильность высокая (табл. 2)
критерий Фишера (5)	$F = 0,504 / 0,266 = 1,893; P(F) = 0,997$	стабильность высокая

Коэффициенты регрессии нормированной (8, табл. 2) регрессионной модели представляют собой количественную оценку степени влияния соответствующего фактора на результирующую функции. Абсолютное значение коэффициента регрессии при X_0 (8) существенно (в 5 ... 24 раза) меньше коэффициентов при X_1, \dots, X_4 , что позволяет говорить о незначительном влиянии псевдофактора X_0 на функцию отклика Y . Поскольку псевдофактор X_0 в нормированном координатном пространстве эксперимента представляет совокупность погрешностей всех величин, входящих в модель, как статистически значимых (результат процесса, независимые факторы), так и всех остальных (случайных или неучтенных влияний), можно сделать вывод о несущественном влиянии погрешностей на результат процесса, то есть о достаточно высокой стабильности процесса.

Выводы

1. Традиционные, нормативно определенные методы оценки стабильности не дают однозначного толкования понятия «стабильность» применительно к сложным процессам, находящимся в состоянии статистической управляемости, например, процессам механической обработки в условиях использования цифровых производственных систем с адаптивным управлением.

2. Объективная количественная оценка стабильности процессов механической обработки на основе традиционных методов является невозможной, поскольку не учитываются физически обоснованные закономерности, определяющие статистическую управляемость рассматриваемых процессов.

3. Нормальный закон распределения численных характеристик процессов, составляющий основу традиционных методов оценки стабильности, применим в условиях массового или крупносерийного производства, нехарактерных для современного машиностроения. Оценки стабильности современных процессов механической обработки должны быть слабо чувствительны к закону распределения.

4. Количественная оценка стабильности процессов с использованием коэффициента вариации и статистического критерия Фишера возможна в условиях современного механообработывающего производства для преимущественно стохастических или относительно несложных статистически управляемых процессов.

5. Сравнительная оценка степени влияния случайных факторов процесса по величине нулевого коэффициента регрессии нормированной многофакторной модели статистически управляемого сложного процесса позволяет качественно установить уровень стабильности процесса. Такой подход дает результат, сходный с оценкой по критерию Фишера, но является менее трудоемким.

Список литературы

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002.
6. ГОСТ Р 50779.11-2000 (ИСО 3534.2-93) Статистические методы. Статистическое управление качеством. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2008.
7. ГОСТ Р 50779.42-99. Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2001.
8. Р 50-601-20-91 Рекомендации по оценке точности и стабильности технологических процессов (оборудования). – М. : ВНИИС, 1991.
9. Горячев, В. В. К вопросу оценки точности технологических процессов / В.В.Горячев, Н.С.Херсонский // Методы менеджмента качества. – 2010. – № 7. – С. 56-58
10. Химмельблау, Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1973. – 960 с.
11. Чигиринский, Ю. Л. Методика статистического оценивания надежности процесса / Ю. Л. Чигиринский, Н. В. Чигиринская // Изв. ВолГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 5 межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – Волгоград, 2009. – № 8. – С. 53-56.
12. Чигиринская, Н. В. Моделирование неперiodических стохастических процессов : Учеб. пособие / Н. В. Чигиринская, Ю. Л. Чигиринский, А. С. Горобцов / ВолГТУ, Волгоград, 2020. – 107 с.
13. Shewhart, W. A. Statistical Methods from the Viewpoint of Quality Control. – Lancaster Press, Lancaster, PA, 1939. – 501 p. – URL : <https://deming.pro/assets/statistical-method-from-the-viewpoint-of-quality-control-shewhart-walter.pdf>.
14. Deming, W. E. Statistical Adjustment of Data. – N. Y., Dover Publications, Inc., 1964. – 261 p. – URL : <https://archive.org/details/statisticaladjus00demi/mode/2up>.
15. Чигиринский, Ю. Л. Reliability of handbook data in technological design / Ю. Л. Чигиринский // Russian Engineering Research. – 2010. – Vol. 30, № 8. – С. 835-837. – Англ. DOI: 10.3103/S1068798X10080216
16. Ronald A. Fisher. Statistical Methods for Research Workers (12th ed.). – Edinburgh : Oliver and Boyd, 1954. – 978-0-05-002170-5. ISBN : 978-0-05-002170-5.
17. Montgomery, Douglas. Design and analysis of experiments (8th ed.). – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, Inc., 2013
18. Крайнев, Д. В. Mathematical Apparatus for Predicting Cutting Tool Life in Turning Process After Prior Plastic Deformation / Д. В. Крайнев, А. А. Бондарев, Ж. С. Тихонова // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). – Cham (Switzerland) : Springer Nature Switzerland AG, [2020]. – P. 1107-1114. – DOI : 10.1007/978-3-030-22063-1_118.
19. Ингеманссон, А. Р. Characteristics, composition, mechanism function and modern aspects of implementation of digital production systems in mechanical engineering industry / А. Р. Ингеманссон // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). – Cham (Switzerland) : Springer Nature Switzerland AG, [2020]. – Vol. 2. – P. 1167-

1174. – DOI : 10.1007/978-3-030-22063-1_124.

20. Ингеманссон, А. Р. Расчётные зависимости для управления токарной и фрезерной обработкой в цифровых производственных системах / А. Р. Ингеманссон, Ю. Л. Чигиринский, В. В. Жуков // Известия ВолгГТУ. Сер. «Прогрессивные технологии в машиностроении». – Волгоград, 2020. – № 3 (238) Март. – С. 26-30.

21. Анализ влияния технологических условий точения на высоту микропрофиля обработанной поверхности / Ю. Л. Чигиринский, А. Р. Ингеманссон, А. Ю. Юдкин, В. В. Головков // Известия ВолгГТУ. Сер. «Прогрессивные технологии в машиностроении». – Волгоград, 2019. – № 1 (224) Январь. – С. 44-47.

22. Стратегия инновационного развития России на период до 2020 года. – 2011. – URL : <https://minsvyaz.ru/common/upload/2227-pril.pdf>.

23. О реализации национальной технологической инициативы. Постановление Правительства РФ от 18 апреля 2016 г., № 317. – URL : <https://nti2035.ru/documents/docs/317.pdf>

24. Ингеманссон, А. Р. Разработка состава и механизмов функционирования информационно-исполнительных киберфизических систем в механообрабатывающем производстве / А. Р. Ингеманссон // Научные технологии в машиностроении. 2017. – № 11 (77). – С. 40-46.

EVALUATION OF THE STABILITY OF THE MACHINING PROCESS USING A MULTIVARIATE REGRESSION MODEL

Julius L. Tchigirinsky, D. Sc. (Engineering), Professor

Nataly V. Chigirinskaya, D. Sc. (Pedagogical), Docent

Alexander V. Evtyunin

Volgograd State Technical University,
28, Lenin's av., Volgograd, 400005, Russian Federation

Abstract

The content of the term «process stability», defined by the normative documents of product quality management systems, in the context of the use of adaptive technological (cyber-physical or digital production) systems, which are the basis for the practical implementation of the «Industry 4.0» concept, is ambiguous. Based on experimental studies of the micro- and macrogeometry of the surface obtained as a result of blade treatment of corrosion-resistant steels, multifactor regression models of various specifications have been built. It is shown that, with a high degree of reliability, the processes of blade processing can be considered statistically controlled. The study of the models made it possible to substantiate the assumption about the possibility of quantitatively assessing the stability of statistically controlled processes by the value of the Fisher statistical criterion, which determines the level of adequacy of the mathematical model of the process, or by the absolute value of the «zero» regression coefficient (otherwise, the «risk factor») of the multivariate model built in the normalized coordinate space.

Keywords: stability, Mechanical processing, Statistical controllability, Quality, Accuracy, Statistical modeling, Multivariate model.

УДК 621.923

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ЗАГОТОВОК ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

*УНЯНИН Александр Николаевич, доктор техн. наук, доцент,
e-mail: a_un@mail.ru*

*СЕМДЯНКИН Илья Викторович, аспирант,
e-mail: Semdyankin73@inbox.ru*

Ульяновский государственный технический университет, 432027, Россия, г.
Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32

Аннотация

При обработке заготовок тонкостенных деталей расстояние до поверхности, расположенной напротив обрабатываемой (толщина заготовки), оказывает значительное влияние на температурное поле. Однако теплосиловая напряженность процесса фрезерования заготовок тонкостенных деталей изучена недостаточно полно. Численным моделированием установлено влияние толщины заготовки на параметры процесса фрезерования: силы резания и трения, мощности источников тепловыделения, температуры в зонах контакта зуба фрезы со стружкой и заготовкой и температуры в поверхностных слоях заготовки. Выявлена толщина заготовки, при фрезеровании которой температуры значительно отличаются от температур при обработке массивных заготовок. Установлено, что температуры при фрезеровании тонкостенных заготовок можно снизить путем интенсивного охлаждения поверхности заготовки, расположенной напротив обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова: моделирование, сила, температура, фрезерование, тонкостенная заготовка, охлаждение.

Введение

В процессе высокопроизводительной механической обработки заготовок маложестких деталей деформации от сил резания, закрепления и температурные деформации соизмеримы с допусками на параметры точности деталей, а деформации деталей, обусловленные перераспределением остаточных напряжений, в некоторых случаях превышают допуски. Широко распространенным методом обработки заготовок маложестких деталей является фрезерование цилиндрическими и концевыми фрезами.

В работах [1, 2] рассмотрены условия возникновения автоколебаний при обработке резанием, обусловленных недостаточной жесткостью и демпфированием технологической системы. В работе [3] исследованы погрешности профиля, возникающие под влиянием вибраций в процессе фрезерования. Показано, что возникновение вибраций ухудшает шероховатость обработанной поверхности, снижает стойкость инструмента и способствует появлению сколов на режущей кромке.

Одним из средств снижения амплитуды вынужденных колебаний в процессе механической обработки является использование инструмента с неравномерным шагом между зубьями [4, 5]. Период времени между работой смежных зубьев фрезы не является постоянным, что позволяет существенно снизить амплитуду вынужденных колебаний.

Повышение работоспособности инструмента и качества обработанных деталей при фрезеровании во многом связано со снижением тепловой напряженности процесса. Тепло-

вые процессы, сопровождающие процесс механической обработки участков заготовок, имеющих значительную толщину, изучены достаточно полно. При механической обработке заготовок тонкостенных деталей тепловые процессы отличаются от протекающих в массивных заготовках. К тонкостенным (с точки зрения тепловых процессов) относят заготовки, толщины которых меньше критической. При обработке таких заготовок расстояние от обрабатываемой поверхности до поверхности, расположенной напротив нее, (толщина заготовки), оказывает существенное влияние на температурное поле в заготовке. Это вызвано низким уровнем теплоотвода необрабатываемой поверхности, поскольку теплоотвод от этой поверхности в окружающую среду существенно меньше того, который реализуется при отводе теплоты из зоны обработки в нижележащие слои заготовки значительной толщины [6, 7].

При аналитическом исследовании теплофизики процесса резания, исходя из принятого маршрута тепловых потоков, определяют соответствующие потоки в инструмент, стружку и заготовку, а затем составляют и решают уравнения теплопроводности для каждого объекта. Недостатком такого подхода является приближенный учет распределения тепловых потоков между объектами. Перспективным является подход, при котором дифференциальные уравнения теплопроводности объектов решают совместно с общими граничными условиями в зоне контакта [9, 10].

Рациональное применение смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) является одним из эффективных путей снижения теплосилового напряжения процессов механической обработки [11, 12]. Поэтому одной из задач исследования является моделирование параметров процесса фрезерования заготовок тонкостенных деталей при различной интенсивности охлаждения поверхности, противоположной обрабатываемой.

Цель исследования – установление влияния толщины заготовки на силовые и тепловые параметры процесса фрезерования, в том числе определение толщины, при которой температурное поле существенно отличается от поля, формирующегося при обработке массивных заготовок.

Методика исследования

Для расчета параметров и температурного поля, возникающих в процессе фрезерования цилиндрическими фрезами и периферией концевых фрез, использовали физические и математические модели [13, 14]. Силы трения и главную составляющую силы резания считывали, как приходящиеся на 1 мм высоты зуба фрезы.

Численное моделирование выполнили при следующих исходных данных: диаметр фрезы – 20 мм; материал зуба фрезы – твердый сплав Т5К10; высота профиля зуба – 4 мм; число зубьев – 5; передний угол фрезы $\gamma = 0^\circ$; скорость резания $V = 3$ м/с; скорость подачи $V_s = 1$ м/мин; глубина резания $t = 1$ мм [15]. Материал заготовки – сталь 40Х. Механические и теплофизические характеристики материала заготовки и фрезы (пределы прочности и текучести, плотности, коэффициенты теплопроводности и теплоемкости) в зависимости от температуры определяли по справочным данным.

Варьировали толщиной заготовки в пределах 0,7 ... 10 мм. Заготовка толщиной 10 мм относится к массивным заготовкам, при обработке которых наличие поверхности, противоположной обрабатываемой, не оказывает влияния на температурное поле в заготовке.

Параметры процесса фрезерования фиксировали при работе 25-го и 35-го зуба, когда поверхностные слои заготовки в достаточной степени прогреты при работе предшествующих зубьев.

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 и 2 представлены результаты, полученные при коэффициенте теплоотдачи от поверхности, расположенной напротив обрабатываемой поверхности заготовки, $\alpha_6 = 40$ Вт/(м²·К), что соответствует теплоотдаче с окружающим воздухом.

Таблица 1 – Зависимость сил резания и мощностей источников тепловыделения от толщины заготовки h_u : номер последовательно работающего зуба фрезы $z_c = 25$; время контакта зуба с заготовкой $\tau = 12,5 \cdot 10^{-4}$ с; коэффициент теплоотдачи от необрабатываемой поверхности заготовки $\alpha_6 = 40$ Вт/(м²·К)

Размер (толщина) заготовки h_3 , мм	Температура деформируемого слоя заготовки T_g , К	Силы трения, Н		Составляющая силы резания P_z , Н	Мощности источников тепловыделения, Вт		
		о переднюю поверхность зуба F_1	задней поверхности зуба о заготовку F_2		в зоне контакта стружки с зубом W_1	в зоне контакта зуба с заготовкой W_2	в зоне деформирования W_g
10	402,5	36,8	50,8	93,4	55,2	152,3	72,7
3	405,5	36,8	50,7	93,2	55	152	72,6
2	407,5	36,7	50,6	93,1	55	151,8	72,5
1,5	412	36,5	50,5	92,8	54,8	151,4	72,3
1	429	36,1	49,9	91,8	54,2	149,7	71,5
0,7	455	35,5	49	90	53	147	70

При обработке заготовок толщиной 3 и 2 мм силы фрезерования, мощности источников тепловыделения и температурное поле практически не отличаются от соответствующих параметров, зафиксированных при обработке заготовок толщиной 10 мм. При обработке заготовки толщиной 2 мм средняя температура в зоне контакта задней поверхности зуба фрезы с заготовкой и температура заготовки на глубине 25 мкм от ее обрабатываемой поверхности увеличились менее, чем на 1%, что несущественно. Другие параметры изменились в еще меньшей степени. Температура заготовки толщиной 1,5 мм и другие параметры процесса фрезерования отличаются от соответствующих параметров при фрезеровании массивной заготовки на 2 ... 4%.

Заметная разница с массивной заготовкой получена при обработке заготовки толщиной 1 мм: температура деформируемого слоя увеличилась на 7%, что привело к снижению сил и мощностей тепловых источников. Однако при этом увеличились как средние так и максимальные температуры в зонах контакта зуба со стружкой и заготовкой и температура заготовки. В большей степени увеличилась температура заготовки: на 7 и 13% на глубине 25 и 500 мкм соответственно. При обработке заготовок толщиной 0,7 мм разница всех параметров в сравнении с массивной заготовкой оказалась еще более значительной. Особенно заметно увеличились температура деформируемого слоя (на 13%), температура заготовки на глубине 25 мкм (на 15%) и на глубине 500 мкм (на 30%). При обработке тонкостенной заготовки ее температуры выше не только на значительном расстоянии, но и вблизи от обрабатываемой поверхности.

Таким образом, заметные изменения температурного поля зафиксированы при фрезеровании заготовки толщиной 1 мм.

Таблица 2 – Зависимость температур от толщины заготовки h_u : номер последовательно работающего зуба фрезы $z_c = 25$; время контакта зуба с заготовкой $\tau = 12,5 \cdot 10^{-4}$ с; коэффициент теплоотдачи от необрабатываемой поверхности заготовки $\alpha_6 = 40$ Вт/(м²·К)

Размер (толщина) заготовки h_3 , мм	Температура на вершине зуба T_E , К	Средняя температура, К на площадках контакта		Максимальная температура, К на площадках контакта		Температура заготовки, К, на глубине	
		стружки с зубом, T_1	зуба с заготовкой, T_2	стружки с зубом, T_{1max}	зуба с заготовкой, T_{2max}	25 мкм	500 мкм
10	990	867	916	1088	1281	563	447
3	992	869	920	1090	1284	566	448
2	992	870	922	1091	1286	568	450
1,5	994	872	926	1093	1288	575	463
1	1000	879	937	1100	1297	603	506
0,7	1009	907	954	1115	1311	647	579

При увеличении в процессе моделирования числа последовательно работающих зубьев фрезы с 25 до 35 температуры в зонах контакта зуба фрезы с заготовками толщиной 0,7 и 1 мм увеличились в среднем на 1%. В большей степени увеличились температура деформируемого слоя материала заготовки и температуры заготовки на глубинах 25 и 500 мкм – в среднем на 5% у заготовок толщиной 0,7 мм (табл. 3, 4).

При турбулентном режиме течения СОЖ коэффициент теплоотдачи определяется зависимостью [16]: $\alpha = 60000 \cdot V^{0.8}$, где V – скорость потока жидкости, м/с. В этих условиях коэффициент теплоотдачи находится в диапазоне 5...50 кВт/(м² · °С). Коэффициент теплоотдачи 5 000 Вт/(м² · К) может быть достигнут при подаче жидкости поливом с расходом 5 дм³ мин [6]. При значительном расходе и скорости течения СОЖ может быть получен коэффициент теплоотдачи 50 000 Вт/(м² · К).

С увеличением коэффициента теплоотдачи от поверхности заготовки, расположенной напротив обрабатываемой поверхности α_6 , поверхностные слои заготовки толщиной 0,7 мм прогреваются в меньшей степени и температура T_g деформируемого слоя уменьшается (табл. 3, 4). В результате незначительно увеличивается напряжение текучести материала заготовки [17], главная составляющая силы резания P_z , силы трения F_1 и F_2 и мощности тепловых источников. При этом температуры в зоне контакта зуба со стружкой и заготовкой снижаются. Причиной снижения контактных температур является то обстоятельство, что зуб фрезы контактирует с материалом заготовки, имеющим меньшую температуру. Более существенно снизились температуры заготовки. Например, при увеличении коэффициента α_6 до 50 000 Вт/(м² · К) температуры заготовки толщиной 0,7 мм на глубинах 25 и 500 мкм снизились на 13 и 24%. При повышении интенсивности охлаждения температура заготовки снижается в большей степени на больших глубинах.

Однако даже при интенсивном охлаждении контактные температуры и температуры заготовки несколько выше, чем при обработке заготовки толщиной 10 мм (массивной) при коэффициенте теплоотдачи $\alpha_6 = 40$ Вт/(м² · К). Причина заключается в недостаточно интенсивном теплоотводе вглубь заготовки, которая быстро прогревается на всю толщину.

Таблица 3 – Зависимость сил резания и мощностей источников тепловыделения от толщины заготовки h_u : номер последовательно работающего зуба фрезы $z_c = 35$; время контакта зуба с заготовкой $\tau = 12,5 \cdot 10^{-4}$ с

Размер (толщина) заготовки h_3 , мм	Коэффициент теплоотдачи α_6 , Вт/(м ² ·К)	Температура деформируемого слоя заготовки T_g , К	Силы трения, Н		Составляющая силы резания P_z , Н	Мощности источников тепловыделения, Вт		
			стружки о переднюю поверхность зуба F_1	задней поверхности зуба о заготовку F_2		в зоне контакта стружки с зубом W_1	в зоне контакта зуба с заготовкой W_2	в зоне деформирования W_g
10	40	413	36,5	50,5	92,8	54,8	151,3	72,3
0,7	40	478	35	48,3	88,9	52,5	145	70
0,7	5000	468	35,2	48,6	89,5	52,8	146	69,7
0,7	50000	419	36,4	50,3	92,5	54,6	150,7	72

Интенсивность теплоотвода в поверхностном слое заготовки при использовании СОЖ ниже, чем в нижележащие слои металла массивной заготовки. В результате градиент температур и плотность теплового потока из зоны обработки снижаются, что и является причиной меньших температур при обработке массивной заготовки.

Варьирование коэффициентом теплоотдачи от поверхности заготовки, расположенной напротив обрабатываемой, не оказывает влияние на параметры процесса и температурное поле при фрезеровании заготовок толщиной 10 мм.

Таблица 4 – Зависимость температур от толщины заготовки h_u : номер последовательно работающего зуба фрезы $z_c = 35$; время контакта зуба с заготовкой $\tau = 12,5 \cdot 10^{-4}$ с

Размер (толщина) заготовки h_3 , мм	Коэффициент теплоотдачи α_6 , Вт/(м ² ·К)	Температура на вершине зуба T_E , К	Средняя температура, К на площадках контакта		Максимальная температура, К на площадках контакта		Температура заготовки, К, на глубине	
			стружки с зубом, T_1	зуба с заготовкой, T_2	стружки с зубом, T_{1max}	зуба с заготовкой, T_{2max}	25 мкм	500 мкм
10	40	993	871	922	1092	1285	578	465
0,7	40	1017	906	967	1136	1320	679	612
0,7	5000	1013	901	960	1133	1316	664	587
0,7	50000	996	875	931	1096	1292	585	465

Выводы

1. Выявлена толщина заготовки, при фрезеровании которой температуры значительно отличаются от температур при обработке массивных заготовок.
2. Установлено, что температуры при фрезеровании тонкостенных заготовок можно снизить путем интенсивного охлаждения поверхности заготовки, расположенной напротив обрабатываемой поверхности.

Список литературы

1. Васильков, Д.В. Реология контактных взаимодействий при обработке резанием / Д.В. Васильков, А.С. Александров, В.В. Голикова // Системный анализ и аналитика. – 2018. – №2 (7). – С. 13 – 20.
2. Васильков, Д.В. Автоколебания при обработке резанием / Д.В. Васильков, А.С. Александров, В.В. Голикова // Системный анализ и аналитика. – 2018. – №3 (8). – С. 25 – 35.
3. Макаров, В.Ф. Повышение виброустойчивости работы концевых фрез при фрезеровании тонкостенных деталей / В.Ф. Макаров, Р.С. Абзаев, С.А. Двинанинов // Справочник. Инженерный журнал. – 2013. – № 3. – С. 6 – 8.
4. Khramov, A. V. Improving the performance of the processing of deep holes by improving the structure of the boring tool. «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering». Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 709 044068. Vol. 3. – 2019.
5. Храмов А.В. Особенности импортозамещения металлорежущего инструмента в современных условиях / А.В.Храмов, Е.Н. Лексин, И.В. Семдянкин, М.В. Назаров, Е.С.Киселев // СТИН, 2016, №1, – С. 21 – 26.
6. Худобин, Л.В. Шлифование заготовок клиновидных изделий / Л. В. Худобин, А. Ш. Хусаинов / Под общ. ред. Л.В. Худобина – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 249 с.
7. Shigeki, O. Study on the geometrical accuracy in surface grinding. Thermal deformation of workpiece in traverse grinding / O. Shigeki, N. Tokuhiko, H. Shinsaki // International journal Japanese society precision engineering. – 1994. Vol. 28. – № 4. – P. 305 – 310.
8. Воронцов, А.Л. Исходные положения и критические замечания о современных методах теоретического исследования теплофизических процессов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. Приложение № 3 (228). – 2016. – С. 2 – 8.
9. Unyanin A.N., Khusainov A.S. The ultrasonic grinding process temperature field study // MATEC Web of Conferences. Vol. 129. – 2017.
10. Унянин А.Н. Исследование температурного поля точения с наложением вибраций / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев // Вектор науки ТГУ. – 2018. – № 3 (45). – С. 63 – 68.
11. Wojciech Stachurski, Jacek Sawicki, Krzysztof Krupanek, Krzysztof Nadolny. Numerical analysis of coolant flow in the grinding zone // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – № 104 (4). DOI: 10.1007/s00170-019-03966-x.
12. Справочник технолога / под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
13. Резников, А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
14. Унянин, А.Н. Аналитическое исследование температурного поля при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний / А.Н. Унянин // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2 (41). – С. 220 – 235.
15. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А. Н. Шевченко и др. / Под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1987. – 846.

16. Сипайлов, В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В. А. Сипайлов. – М. : Машиностроение, 1978. – 167 с.

17. Васин, С. А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учебник для технических вузов / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М. : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с.

MODELING OF THE FIELD WHEN MILLING THIN-WALLED WORKPIEC

Unyanin A.N., D. Sc. (Engineering), e – mail: a_un@mail.ru

Semdyankin I.V. e – mail: Semdyankin73@inbox.ru

Ulyanovsk State Technical University, 432027, St. North. Crown, 32, Ulyanovsk, Russian Federation

Abstract

During machining thin-walled parts, the presence of a surface opposite to the milled one has a significant effect on the temperature field. However, the heat-power intensity of the process of milling workpieces of thin-walled parts has not been fully studied. Numerical modeling established the influence of the thickness of the workpiece on the parameters of the milling process: cutting and friction forces, capacity of thermal power sources, temperature in the contact zones of the cutter tooth with chips and workpiece and temperature in the surface layers of the workpiece. Identified the thickness of the workpiece, when milling which the temperatures differ significantly from the temperatures when processing massive workpieces. A marked difference with a massive workpiece was obtained during machining a workpiece with a thickness of 1 mm; during machining workpieces with a thickness of 0.7 mm, a significant temperature difference was obtained. It has been found that temperatures during milling of thin-walled workpieces can be reduced by intensive cooling of the workpiece surface located opposite the machined surface. With an increase in the heat transfer coefficient from this surface to 50,000 W / (m² × K), the temperatures of a 0.7 mm thick workpiece at depths of 25 and 500 microns decreased by 13 and 24%.

Keywords: modeling, force, temperature, milling, thin-walled workpiece, cooling.

УДК 621.914.22

ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВНУТРЕННЕГО КОЛЬЦА ДВУХРЯДНОГО ПОДШИПНИКА ИЗ СТАЛИ ШХ15СГ

*КРЕНЬ Александр Петрович¹, доктор технических наук,
e-mail: alekspk@mail.ru*

МОЛЕВ Сергей Геннадьевич², e-mail: mpz@mpz.com.by

КУТЕПОВ Алесь Юрьевич¹, e-mail: aleskutepov@gmail.com

*ДЕЛЕНДИК Михаил Николаевич³, кандидат технических наук,
e-mail: delendik@mirpk.by*

¹ Институт прикладной физики НАН Беларуси, 220072, Беларусь, г. Минск, Академическая ул., 16,

² ОАО «Минский подшипниковый завод», 220026, Беларусь, г. Минск, Жилуновича ул., 2

³ Филиал БНТУ «Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров по менеджменту и развитию персонала», 220107, Беларусь, г. Минск, Партизанский пр-т, 77

Аннотация

Приведены результаты исследования напряженного состояния внутреннего кольца двухрядного подшипника из стали ШХ15СГ с помощью роботизированного рентгеновского дифрактометра GNRSTRESSX. Изучен характер распределения напряжений в различных точках изделия: на боковой поверхности, дорожках качения, а также по глубине на расстоянии от поверхности до 150 мкм. Показано влияние финишной обработки на создание сжимающих напряжений на поверхности подшипникового кольца. Показано, что полученные результаты могут использоваться для изучения изменения напряженного состояния при различных температурах и режимах эксплуатации.

Ключевые слова: подшипник, внутренние напряжения, рентгеновский дифрактометр

Введение

Сталь ШХ15СГ обладает комплексом высоких механических характеристик, включая высокую твердость, хорошую износостойкость и контактную усталостную долговечность. Она широко используется в качестве материала для изготовления колец и тел качения, обладающих высокой прочностью, например, высокотемпературных и быстроходных подшипников.

Особое влияние на срок службы таких изделий оказывает стабильность их размеров. При этом основными факторами, влияющими на постоянство размеров, являются наличие остаточных напряжений σ и метастабильное фазовое превращение «аустенит-мартенсит». Ряд работ [1-4], проведенных в этом направлении, помог установить следующие закономерности. Остаточное напряжение не только зависит от процесса обработки, но также связано с геометрическими размерами, например, поверхностное растягивающее напряжение может быть больше в более тонких частях изделия. Остаточное напряжение и геометрические размеры неоднозначным образом зависят от изменения температуры эксплуатации подшипника, что вызвано выпадением карбидов и изменением структуры стали. Остаточный аустенит подшипниковой стали не полностью трансформируется в процессе низкотемпературного отпус-

ка, в связи с чем внутренний диаметр кольца подшипника может увеличиваться во время хранения. При этом охлаждение перед отпуском улучшает стабильность размеров. Повышение температуры отпуска и увеличение времени отпуска изменяет количество остаточного аустенита и является основным методом обеспечения стабильности размеров материалов подшипниковой стали.

Несмотря на многочисленные исследования [5-9], остаются неизученными вопросы изменения механических напряжений во время эксплуатации подшипников, а также механизм совместного влияния фазового превращения и остаточных напряжений на изменение их размеров. Большой проблемой также является изучение распределения внутренних напряжений в больших изделиях из-за конструктивных особенностей измерительной системы большинства рентгеновских дифрактометров, не позволяющих провести контроль на крупногабаритных изделиях сложной конфигурации.

Описание экспериментальных исследований

В настоящей работе анализируется возможность оценки остаточного напряжения в различных точках кольца подшипника 3760.02 с наружным диаметром 355 мм, шириной 105 мм, массой 17,6 кг, выполненным из стали ШХ15СГ с целью принятия дальнейших решений по изменению параметров термообработки.

Для проведения измерений использовался роботизированный рентгеновский дифрактометр GNR STRESS X (рисунок 1). Режим измерения – Ψ . Данный дифрактометр позволяет проводить измерения на изделиях практически любых размеров благодаря закреплению рентгеновского источника на роботизированном манипуляторе, имеющем 6 степеней свободы. Во всех случаях нами применялось излучение $\text{CrK}\alpha$. В качестве рентгеновского максимума для определения напряжений использовали пик $\{211\}$ ОЦК-решетки стали (угловая координата $2\theta_{211}=156^\circ$). Диаметр коллиматора был выбран равным 0,5 мм. Точность позиционирования – 20 мкм. Мощность – 30 кэВ.

Для исследуемого материала глубина проникновения рентгеновских лучей теоретически составляет 5-10 мкм. Поэтому при проведении расчетов главных напряжений (σ_{\max} и σ_{\min}) значение вертикальной составляющей тензора напряжений принималось равным нулю, т.е. в каждой отдельной точке измерения рассматривалось как плосконапряженное. На рисунках 1-3 показаны результаты измерений в различных точках кольца подшипника. Так, численные значения σ_{\min} на боковой поверхности (рисунок 1) свидетельствуют, что ее шлифование приводит к возникновению достаточно больших сжимающих напряжений (до -470 МПа) с достаточно однородным распределением. Они будут благоприятно сказываться на надежности подшипника, поскольку препятствуют росту внутренних подповерхностных трещин. При этом направление главных напряжений (рисунок 1) соответствует технологии бесцентрового шлифования вращающимся инструментом.

Для оценки изменения напряжений внутри кольца проводилось электролитическое травление с помощью установки Krystall 650 на различную глубину. Это позволило установить, что уже на расстоянии 25-30 мкм от поверхности σ становятся растягивающими (рисунок 2), а на глубине 50-200 мкм σ_{\max} остаются практически постоянными, приобретая значение $\approx +300-370$ МПа.

Их максимальное значение $\approx +370$ МПа не является критическим для работоспособности изделия. При измеренной твердости $60,3 \pm 2$ HRC предел текучести для ШХ15СГ составляет (в зависимости от температуры отпуска) около 1800-2000 МПа. Эти данные указывают на достаточно качественно проведенный отпуск с целью снятия напряжений.

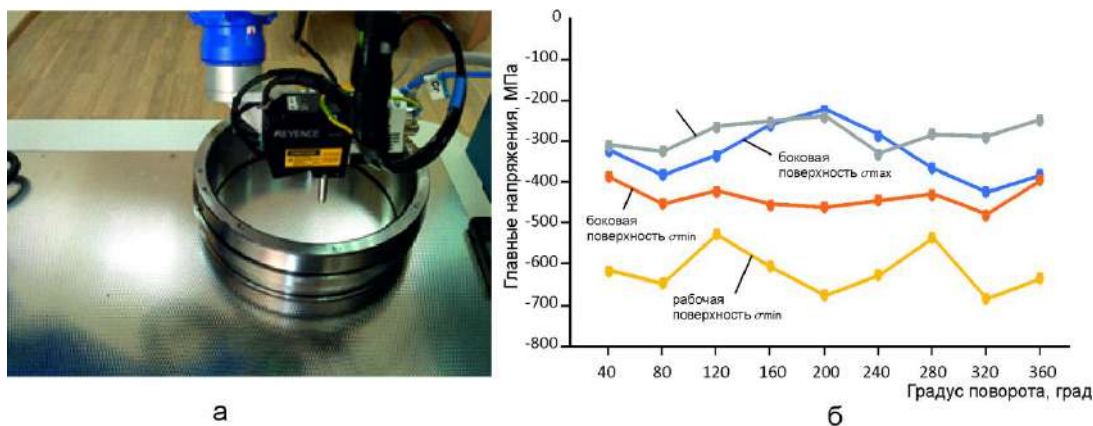


Рисунок 1 – Процесс измерения на боковой поверхности кольца (а) и результаты измерений главных напряжений на боковой и рабочей (в центре) поверхности кольца

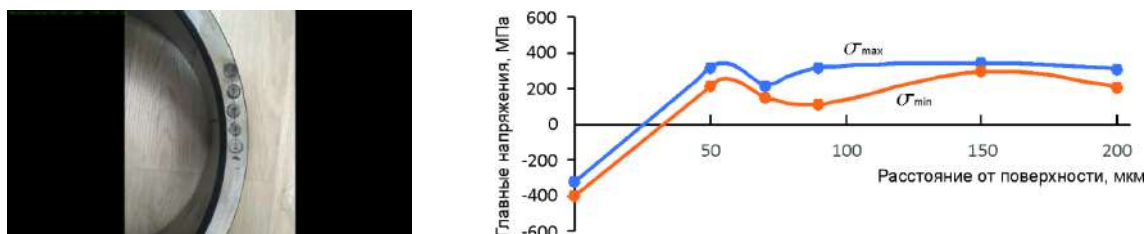


Рисунок 2 – Распределение напряжений по глубине на боковой поверхности кольца: а - место травления, б- график изменения

Изучение характера напряжений на рабочей поверхности (рисунок 3) позволило выявить следующую картину. Финишная обработка увеличивает сжимающие напряжения до $\sigma_{min} \sim -700$ МПа (по сравнению со значениями, полученными на боковой поверхности (-470 МПа)). При этом на глубине свыше 20-30 мкм напряжения также являются растягивающими (рисунок 3). По краям дорожки качения в областях, где финишная обработка не проводилась напряжения являются растягивающими также, как и под обработанной поверхностью и составляют около 300 МПа.

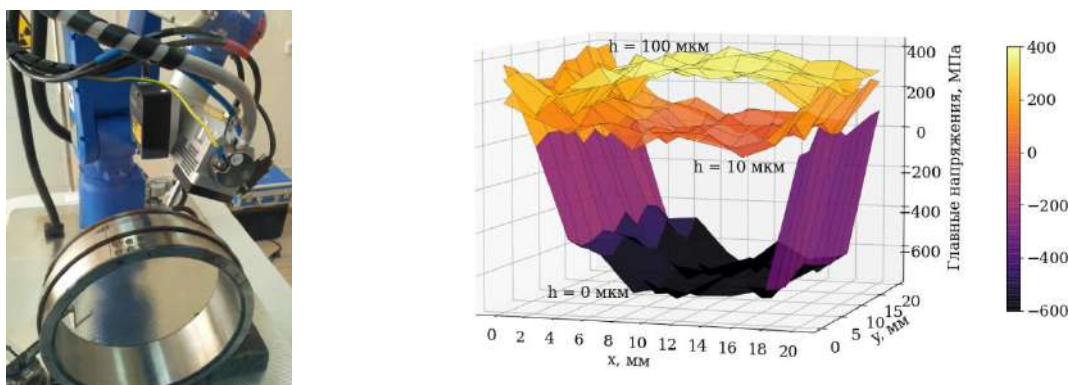


Рисунок 3 – Измерение на рабочей поверхности с различной глубиной травления (а) и карта распределения напряжений на различной глубине

Выводы

Результаты измерений говорят о достаточной эффективности использования оборудования для изучения напряженного состояния кольца подшипника из стали ШЧ15СГ. Полученные данные позволяют установить характер изменения напряжений в различных точках поверхности подшипника, оценить влияние финишной обработки на изменение напряжений в поверхностном слое и его толщину, изучить степень равномерности распределения напряжений на рабочей поверхности изделия.

Полученные результаты могут использоваться для систематического анализа влияния остаточного напряжения на стабильность размеров подшипниковой стали при температурах эксплуатации путем измерения σ и наблюдения за эволюцией микроструктуры (например выпадением или растворением карбидов), а также изменением размеров кольца подшипника при различных рабочих температурах и временных условиях.

Список литературы

1. T.L. Fu, X.T. Deng, G.H. Liu, Z.D. Wang, G.D. Wang Experimental study of cooling speed for ultra-thick steel plate during the jet impinging and quenching process // *Int J Precis EngManuf*, 17 (11) (2016), pp. 1503-1514
2. B. Decaudin, M.C. Djega, G. Cizeron Structural study of M50 steel carbides // *J Alloys Compd*, 226 (1) (1995), pp. 208-212
3. Z.X. Huang, J.M. Chen Experimental analysis of bearing dimensional stability // *Bearing* (10) (2003), pp. 29-30
4. Q.L. Han, G.Q. Liu, S. Xiang, A.D. Wang Research on dimensional stability of bearing steel at room temperature // *Ordinance Material SciEng* (6) (2007), pp. 38-41
5. Z.W. Peng, L.J. Li, J.S. Chen, X.D. Huo, J.X. Gao Isothermal precipitation kinetics of carbides in undercooled austenite and ferrite of a titanium microalloyed steel // *Mater Des*, 108 (2016), pp. 289-297
6. J.G. Jung, J.S. Park, J. Kim, Y.K. Lee Carbide precipitation kinetics in austenite of a Nb-Ti-V microalloyed steel // *Mater SciEng*, 528 (16–17) (2011), pp. 5529-5535
7. F. Wang, D.S. Qian, H. Lin, H. Xiao The effect of prior cold rolling on the carbide dissolution, precipitation and dry wear behaviors of M50 bearing steel // *J TribolInt*, 132 (2019), pp. 253-264
8. X.D. Huo, L.J. Li, Z.W. Peng, S.J. Chen Effects of TMCP schedule on precipitation, microstructure and properties of Ti-microalloyed high strength steel // *Journal of Iron and Steel Research, International*, 23 (6) (2016), pp. 593-601
9. L.N. Zhou, G.Z. Tang, X.X. Ma, T.B. Wu, K.L. Zhao Effect of austenitizing temperature on microstructure of M50 steel // *Trans Mater Heat Treat*, 37 (7) (2016), pp. 89-94

STUDY OF THE STRESS STATE OF THE INNER RING OF A DOUBLE-ROW BEARING FROM 100Cr6 STEEL

Kren A.P., D.Sc. (Engineering), e-mail: alekspk@mail.ru

Molev S.G., email: mpz@mpz.com.by

Kutepov A.Y., email: aleskutepov@gmail.com

Delendik M.N. Ph.D., email: delendik@mipk.by

Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 220072, Minsk, Akademicheskaya str., 16, Belarus

JSC "Minsk Bearing Plant", 220026, Minsk, Zhilunovicha str., 2, Belarus

Branch of the BNTU "Intersectoral institute for staff training and retraining on management and personnel development", Minsk, Republic of Belarus", 220107, Minsk, Partizanskyave., 77, Belarus

Abstract

The results of studying the stress state of an internal double-row bearing made of 100Cr6 steel using a robotized X-ray diffractometer GNR STRESS X are presented. The character of the stress distribution at various points: on the lateral surface, raceways, as well as in-depth at a distance from the surface up to 150 microns is established. The effect of finishing treatment on the creation of compressive stresses on the surface of the bearing ring is shown. It is shown that received results can be used for the study of the stress state at various temperatures and operating conditions.

Keywords: bearing, internal, X-ray diffractometer.

УДК 621.941.1

О ХАРАКТЕРЕ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТОНКОСТЕННОЙ ВТУЛКИ СФЕРИЧЕСКОЙ ФРЕЗОЙ

¹ЯМНИКОВ Александр Сергеевич, д.т.н., профессор,
e-mail: yamnikovas@mail.ru

¹БОГОМОЛОВ Максим Николаевич, аспирант,
e-mail: bogomolovmn@mail.ru

¹Тульский государственный университет, 300012, Российская Федерация,
г. Тула, пр. Ленина, 92

Аннотация

Показано, что стремление к снижению массы изделий приводит к уменьшению толщины их стенок и жесткости при закреплении на станочных операциях. Это приводит к появлению существенных упругих деформаций заготовки и вибрациям при резании. Теоретически обосновано, что в рассматриваемом конкретном случае фрезерования тонкостенной втулки двузубой сферической фрезой с частотой вращения 3000 мин⁻¹, вибрации носят вынужденный характер. Предложено использовать для снижения амплитуды вибраций подкрепление нежесткой втулки путем разработки конструкции оправки повышенной виброустойчивости для фрезерования тонкостенных втулок.

Ключевые слова: вибрации, тонкостенная втулка, сферическая фреза, упругие деформации, сила резания, параметры режимов резания.

Введение

В таких отраслях промышленности как производство ракетной техники конструкторы стремятся максимально снизить массу изделий, что приводит к уменьшению толщины их стенок и, соответственно, к снижению жесткости. Эти обстоятельства приводят к упругим деформациям заготовок при закреплении в приспособлениях [1, 2] и к появлению вибраций при обработке резанием [3, 4].

Экспериментальные исследования

В связи с этим представляет интерес проанализировать действующий технологический процесс обработки тонкостенных втулок и выявить наиболее слабые звенья этой цепи. Анализируемая деталь (Рис. 1) представляет собой тонкостенный цилиндр с толщиной стенки 2,5 мм.

На верхней поверхности находятся две ступени 1, в которых необходимо сделать 8 лысок 2 с радиусом $R_{\max} 20_{-3}$. При этом к поверхности 2 предъявляется требование по шероховатости $Ra 6,3$ и отклонению от цилиндричности не более 0,1 мм [6]. В качестве заготовки выступает труба 121x7 ГОСТ 8732-78 из стали 30 ГОСТ 1050-88. Такое сочетание размеров (большое соотношение габаритов к толщине стенки втулки) понижает её жесткость при обработке, что является дополнительным фактором, провоцирующим вибрации.

На основе технико-экономического анализа на производстве принят вариант формообразования фасонной поверхности втулки фрезерованием сферической корпусной фрезой RBH BCF3028S32-160 со сменными пластинами ZCET 150CE на 4-х координатном станке с ЧПУ "Akira seiki performa V4 XP". Заготовку устанавливали с зазором на жесткую оправку,

закрепленную в делительной головке 4-ой поворотной оси станка. Зажим производили с помощью шайбы, шпильки, ввинченной в жесткую оправку, и гайки (рис. 2).

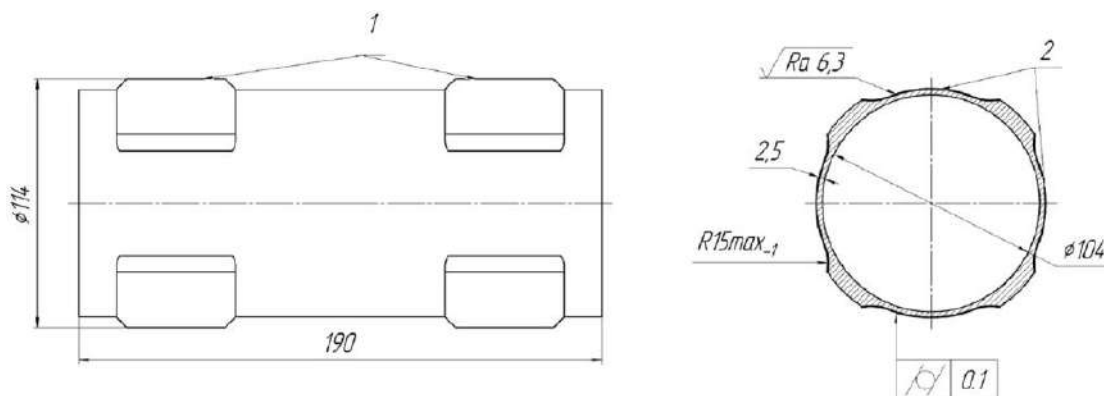


Рисунок 1 – Обработка галтелей на фасонной втулке:
а – операционный эскиз фасонной втулки

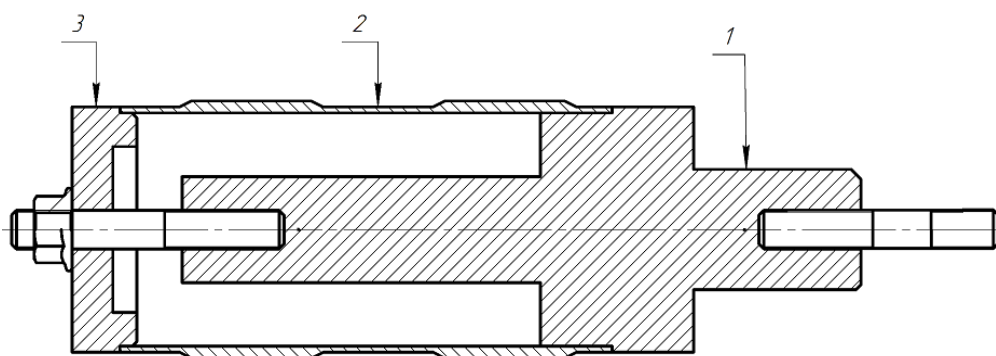


Рисунок 2 – Установка втулки в центрирующей оправке на действующем производстве



Рисунок 3 – Фото обработанной поверхности

После врезания на всю глубину обрабатываемого профиля для обработки цилиндрического участка поверхности применяли построчное перемещение фрезы с режимом резания: $V = 282,6$ м/мин, $n = 3000$ мин⁻¹, $S_{\text{мин}} = 3000$ мм/мин, $t = 2,5$ мм, $B = 0,4$ мм. В итоге получили обработанную заготовку со следами ярко выраженной вибрации (рис. 3).

На фото видны ярко выраженные следы обработки, вызванные вибрациями инструмента и заготовки, вследствие чего не удастся достичь удовлетворительных параметров качества [6].

Таблица 1 – Средние/максимальные значения измеренной шероховатости поверхности, обработанной при закреплении на жесткой оправке с зазором

Шероховатость поверхности Ra, мкм		
Поверхность 1	Поверхность 2	Поверхность 3
9,76 /12,4	6,66/7,6	6,62/7,5

Теоретические исследования

В работе [7] показано, что наибольшая интенсивность автоколебаний проявляется, если соотношение времени резания T_1 с периодом собственных колебаний тонкостенного элемента T_2 , названное определяющим соотношением [defining relationship] DF , находится в пределах от 7 до 1: ($7 > DF = T_1/T_2 \geq 1$). В работе [8] установлено, что наиболее опасными для детали в поперечных направлениях, в котором на деталь действует формообразующая режущая кромка фрезы, является режим с частотой 1 964 Гц. Тогда $T_2 = 1/1964 = 0.00051$ с.

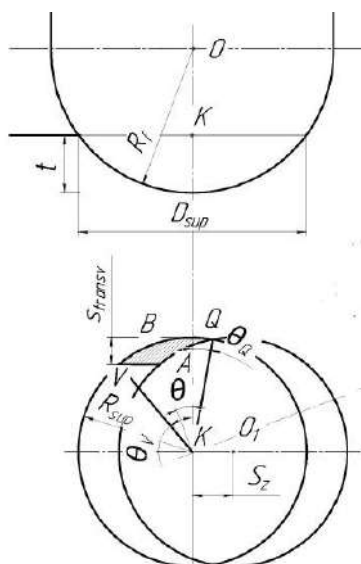


Рисунок 4 – Схема расчета угла контакта зуба фрезы

Время резания одним зубом T_1 определяется по формуле:

$$T_1 = \frac{(\theta_V + \theta_Q) \cdot 60}{2\pi n}, \text{ с}$$

где $(\theta_V + \theta_Q)$ - угол, на котором режущая кромка одного зуба контактирует с заготовкой.

На рисунке 4: точка O – центр фрезы текущего реза, точка O_1 – центр предыдущего реза, R_f – радиус инструмента, t – глубина резания, s_z – подача на зуб, θ_V - угол начала реза, θ_Q - угол конца реза. Подставляя конкретные данные, получаем $T_1 = 0.8 \cdot 60 / 2\pi n = 0,000254$ с, $T_2 = 1/1964 = 0.00051$ с, тогда значение $DF = T_1/T_2 = 0,5$ находится вне интервала $0,5 \notin [1;7]$, характерного для появления автоколебаний.

Следовательно, данная технологическая система устойчива против автоколебаний, а те шероховатости, которые наблюдаются на обработанной поверхности, являются следами вынужденных колебаний.

Упругий прогиб стенки заготовки можно определить по известной методике теории упругости [9]. Для определения величины прогиба необходимо знать величину осевой составляющей силы резания и колебания этой величины, но зависимости для определения наибольшего значения осевой (для сферической фрезы) силы резания Q_z в литературе нет. Имеются только зависимости для определения главной (окружной) составляющей силы резания, поэтому было принято решение воспользоваться рекомендацией о подкреплении не жесткой втулки [9], путем разработки конструкции оправки повышенной виброустойчивости для фрезерования тонкостенных втулок [10, 11]. Повышение жесткости тонкой стенки втулки достигается осевым сжатием набора резиновых шайб, помещенным в зазор между обрабатываемой втулкой и центральным стержнем оправки. Замеры шероховатости поверхности втулки, обработанной на оправке повышенной виброустойчивости, приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Средние/максимальные значения измеренной шероховатости поверхности, обработанной при закреплении на оправке повышенной виброустойчивости

Шероховатость поверхности Ra, мкм		
<i>Поверхность 1</i>	<i>Поверхность 2</i>	<i>Поверхность 3</i>
5,72/6,9	4,26/5,2	4,26/5,2

Из сравнения данных таблиц 1 и 2 видно, что во втором случае шероховатость поверхности в $1,5 \div 2$ раза ниже.

Выводы

1. Показано, что рассмотренное сочетание конструктивных и технологических факторов фрезерования тонкостенной втулки сферическими фрезами, вызывает вынужденные колебания стенки втулки, приводящие к образованию регулярной шероховатости, превосходящей допускаемую величину.

2. Использование оправки повышенной виброустойчивости снижает шероховатость обработанной поверхности в $1,5 \div 2$ раза.

Отчетное исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научно-исследовательского проекта «Аспиранты» №20-38-90248-РФФИ.

Список литературы

1. Yamnikov A. S., Yamnikova O.A., Matveev I.A., Rodionova E.N. Errors in Clamping Thin-Walled Pipe // Russian Engineering Research. - 2019. – Vol. 39(11). - P. 966–969. - Текст: непосредственный.
2. Ямникова О. А. Упругие деформации заготовок полых осесимметричных корпусов при закреплении в трехлапчатых патронах / О. А. Ямникова, А. С. Ямников, А. О. Чуприков, И. А. Матвеев. // Черные металлы. - 2018. - №6. - С. 25-30. - Текст: непосредственный.
3. Yamnikov A. S. Reducing the dynamic loads impact on the milled thin-wall sleeve surface quality /A. Yamnikov, M. Bogomolov, O. Yamnikova. - URL: <https://doi.org/10.1063/1.5138439>. (date of the application 23.11.2020). – Text : electronic.
4. Comak A. Modeling dynamics and stability of variable pitch and helix milling tools for development of a design method to maximize chatter stability / A. Comak, E. Budak. // Precision Engineering. - 2017. - №47. - P. 459-468. - Текст: непосредственный.
5. Балакшин, Б. С. Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин // Москва: Машиностроение. – 1969. - 556 с. - Текст: непосредственный.
6. Ямников А. С. Центрирующая оправка повышенной виброустойчивости для фрезерования тонкостенных втулок / А. С. Ямников, М. Н. Богомоллов // Черные металлы. - 2019. - №5. - С. 52-57. - Текст: непосредственный
7. Внуков Ю.Н. Определение условий фрезерования сферическими и тороидальными фрезами / Ю. Н. Внуков, С. И. Дядя, В. А. Кришталь, Н. Н. Черновол // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. Запорізький національний технічний університет (Запоріжжє). - 2015. - №2. - С. 28-34. - Текст: непосредственный. ISSN 1607-6885.
8. Yamnikov A. S. Simulation of Oscillation Frequency Effects on Complex Shape Part Milling/ A. S. Yamnikov and M. N. Bogomolov // Cite as: AIP Conference Proceedings 2188 - 050012 (2019); - Текст: непосредственный. <https://doi.org/10.1063/1.5138439>.

9. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3-х томах. Т. 2. Под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. М. - Машиностроение. – 1968. - 464 с. - Текст: непосредственный.
10. Ямников А. С. Центрирующая оправка повышенной виброустойчивости для фрезерования тонкостенных втулок / А. С. Ямников, М. Н. Богомолов // Черные металлы». – 2019. - №5. - С. 52-57. - Текст: непосредственный.
11. Ямников А.С. Фрезерная базирующе - зажимная оправка / А. С. Ямников, М. Н. Богомолов, А. О. Чуприков // Технология машиностроения. - 2019. - № 12. - С. 13-17. - Текст: непосредственный.

THE NATURE OF VIBRATIONS WHEN MACHINING A THIN-WALLED BUSHING WITH A SPHERICAL MILLING CUTTER

Yamnikov A. S., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: yamnikovas@mail.ru
Bogomolov M.N., graduate student, e–mail: bogomolovmn@mail.ru

Tula State University, 300012, Lenina Ave., 92, Tula, Tula region, Russian Federation

Abstract

It is shown that the desire to reduce the weight of products leads to a decrease in the thickness of their walls and rigidity when fixing on machine operations. This leads to the appearance of significant elastic deformations of the workpiece and vibrations during the cutting process. It is theoretically substantiated that in this particular case of a thin-walled sleeve milling with a two-toothed spherical cutter with a rotational speed of 3000 min^{-1} , the vibrations are forced. It is proposed to use a non-rigid bushing reinforcement to reduce the vibration amplitude by developing a design of a mandrel with increased vibration resistance for the milling of thin-walled bushings.

Keywords: vibrations, thin-walled bushing, spherical milling cutter, elastic deformations, cutting force, parameters of cutting modes.

УДК 621.9

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ
ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ**

*МИХАЙЛОВ Александр Николаевич^{1,2}, доктор техн. наук, профессор,
e-mail: mntk21@mail.ru*

*МИХАЙЛОВ Дмитрий Александрович³, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: mitia3@donapex.net*

¹Донецкий национальный технический университет, 283001, ДНР, г. Донецк, ул. Артема, 58

²Донской государственный технический университет, 344000, Российская Федерация,
г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

³Академия гражданской защиты, 283050, ДНР, г. Донецк, ул. Розы Люксембург, 34, а

Аннотация

В работе выполнен анализ особенностей эксплуатации газотурбинного двигателя, при этом установлено, что на его структуру действуют неравномерные эксплуатационные функции, которые приводят к неравномерным и неодинаковым износам и разрушениям его структурных элементов. Для повышения эксплуатационных свойств основных элементов, деталей, групп деталей и подсистем газотурбинного двигателя, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий, предложено обеспечение функционально-ориентированных свойств. Эти свойства позволяют значительно повысить эксплуатационные свойства газотурбинного двигателя и обеспечить заданный, требуемый или предельный его эксплуатационный потенциал. Рассмотрены технологические особенности повышения ресурса деталей газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств. Для реализации функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя разработан общий подход их формирования на базе комплексного многосвязного технологического процесса.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, структура, функционально-ориентированные свойства, равный ресурс элементов, многосвязный технологический процесс.

Введение

Авиационный газотурбинный двигатель (ГТД) представляет собой тепловой силовой агрегат, имеющий сложную систему, состоящую из множества отдельных деталей, групп деталей, узлов и подсистем [1, 2, 3]. Посредством этих составляющих выполняется преобразование тепловой в механическую энергию, которое осуществляется в процессе реализации термодинамического цикла Брайтона[1]. При этом основной особенностью эксплуатации ГТД является возникновение на основных его элементах, деталях и группах деталей, располагаемых по проточной части двигателя, неравномерных эксплуатационных функций, которые приводят к появлению неравномерных их износов и разрушений, характеризуемых неравномерностями R-родов [4]. Эти особенности приводят к снижению технико-экономических показателей и эксплуатационных свойств ГТД.

Для повышения указанных выше параметров ГТД в работах [5, 6] предложено обеспечение деталям, группам деталей, узлам и подсистемам функционально-ориентированных свойств (ФОС). Формирование ФОС структурных элементов ГТД позволяет компенсировать действие эксплуатационных неравномерностей износа R -родов по его иерархической структуре. ФОС структурных элементов ГТД это специальные свойства деталей, групп деталей, узлов и подсистем, выполняемые на базе группы особых принципов ориентации технологических воздействий и физико-механических свойств в соответствии с особенностями действия эксплуатационных функций [5]. Для реализации ФОС структуре ГТД в работе [5] разработана группа особых принципов ориентации свойств и технология их обеспечения. Можно отметить, что обеспечение ФОС структуры ГТД должно выполняться на базе комплексного

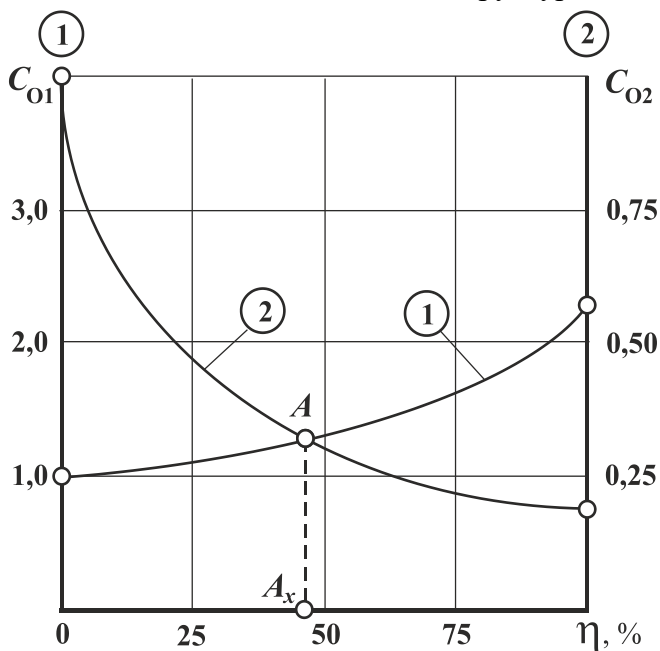


Рисунок 1 – Графики определения рационального объема обеспечения ФОС элементам структуры ГТД: 1 – зависимость относительной стоимости C_{O1} изготовления ГТД от % его деталей с ФОС; 2 – зависимость относительной себестоимости C_{O2} эксплуатации ГТД от % его деталей с ФОС

многосвязного технологического процесса [7, 8].

Следует отметить, обеспечение ФОС можно выполнять не всей структуре ГТД, а только определенной части, а именно только тем деталям, которые испытывают переменные эксплуатационные функции. В работе проведены исследования, направленные на определение рационального объема обеспечения ФОС структурных элементов ГТД. На рис. 1 приведены графики определения рационального объема обеспечения ФОС элементам структуры ГТД. Здесь показаны следующие графики: 1 – зависимость относительной стоимости C_{O1} изготовления ГТД от % его деталей с ФОС; 2 – зависимость относительной себестоимости C_{O2} эксплуатации ГТД от % его деталей с ФОС. Анализ этих графиков позволил установить, что рациональный объем обеспечения ФОС структуре ГТД находятся в пределах $\eta = 44 \dots 52 \%$ от общего количества деталей двигателя. Вместе с тем, для формирования ФОС структуре ГТД необходима специальная технология и

технологическое обеспечение.

Целью данной работы является разработка технологического обеспечения реализации ФОС иерархической структуре элементов ГТД, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций, обеспечивающих повышение его эксплуатационных свойств.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: провести анализ структуры ГТД и установить особенности эксплуатации его элементов; разработать принципы и технологический подход обеспечения ФОС структуре ГТД; выполнить синтез технологического обеспечения реализации ФОС структурных элементов ГТД.

Эти задачи решаются в данной работе.

1. Структура и основные особенности эксплуатации ГТД

Структуру ГТД можно представить как совокупность элементов и отношений между ними:

$$Str = Str\{X, A\},$$

Str - структура элементов ГТД;

X – множество структурных элементов ГТД;

A – множество связей (отношений) на множестве структурных элементов X .

Здесь:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n\};$$

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_m\},$$

где X_i – i -й структурный элемент множества X ;

A_j – j -е отношение (связь) между структурными элементами X на множестве A ;

n – мощность множества X ;

m – мощность множества A .

Следует отметить, что на основании проведенных исследований, представленных в работах [9, 10], установлено, что элементы структуры ГТД можно представлять как иерархическую структуру, состоящую из R -уровней. При этом на элементы этой структуры действуют неравномерные эксплуатационные функции, которые приводят к возникновению неодинакового износа элементов R -родов [4, 10].

Для формирования ФОС иерархической структуре ГТД необходимо обеспечение ФОС R -уровней. Процесс обеспечения ФОС структуре ГТД выполняется на базе группы особых принципов ориентации, представленных в работе [5], и ряда условий распределения физико-механических свойств между элементами его структуры. Для формирования ФОС структурных элементов ГТД в работах [7, 8, 10] разработано необходимое технологическое обеспечение, базирующееся на комплексном многосвязном технологическом процессе, обеспечивающем реализацию множества многосвязных технологических процессов R -уровней.

2. Принципы и технологические особенности обеспечения ФОС структуре ГТД

Можно отметить, что технологическое обеспечение формирования ФОС структуре ГТД X (рис. 2) имеющей R -уровней базируется на следующих принципах:

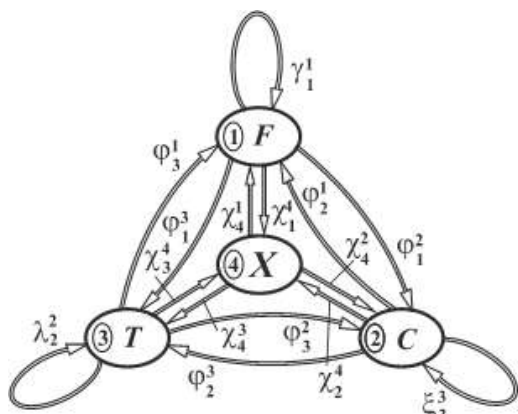


Рисунок 2 – Структура и схема связей между составляющими системы формирования ФОС структурных элементов ГТД

1. На группе особых принципов ориентации эксплуатационных функций F (позиция 1, рис. 2), ФОС C (позиция 2) и технологических воздействий T (позиция 3) [5], а именно: функциональной ориентации, топологической ориентации, количественной ориентации, структурной ориентации и так далее.

2. На обеспечении равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств (надёжность, долговечность, ресурс, ремонтпригодность, восстанавливаемость и тому подобные свойства) отдельных элементов структуры ГТД [6, 10],

а именно: микро-, макрзоны, зоны, поверхности, детали, группы деталей, подсистемы и вся система.

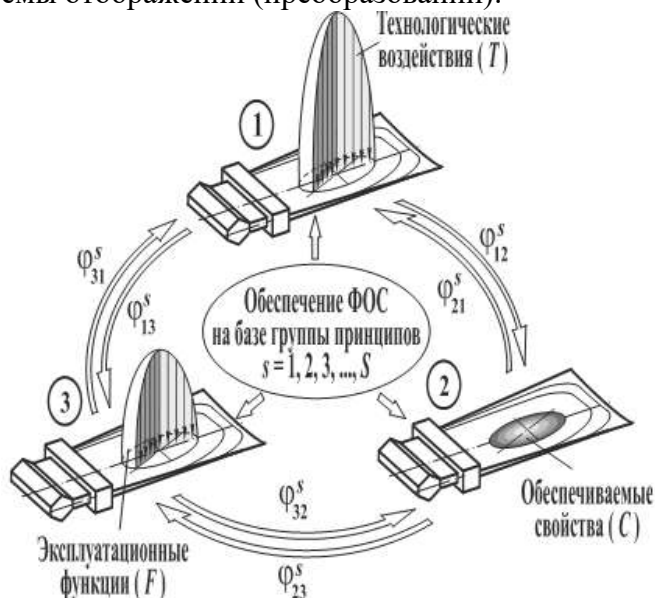
3. На последовательном распределении ФОС по элементам иерархической структуры от зоны действия максимального воздействия к минимальному значению.

4. На комплексности реализации множества технологических процессов на множестве отдельных деталей структуры ГТД с ФОС.

5. На обеспечении связей между иерархической структурой элементов ГТД X и параметрами эксплуатационных воздействий F , ФОС структуры ГТД C и особенностями технологических воздействий T (рис. 2).

Процесс реализации ФОС иерархической структуры элементов ГТД, представляемой R -уровнями, можно моделировать с помощью структуры и схемы связей между составляющими системы формирования ФОС (рис. 2). На рис. 2 представлена структура и схема связей между составляющими системы формирования ФОС структурных элементов ГТД. Здесь показаны следующие элементы: F (позиция 1) – эксплуатационные функции; C (позиция 2) – обеспечение ФОС структуре ГТД; T (позиция 3) – технологические воздействия (технология) для реализации ФОС структурных элементов ГТД; X (позиция 4) – структурные элементы ГТД (микро-, макрзоны, зоны, поверхности, детали, группы деталей, подсистемы, ГТД). Стрелками показаны прямые и обратные связи обеспечения ФОС, петли обозначают возвратные процессы обеспечения ФОС в зависимости от уровня структурных элементов ГТД.

На рис. 3 представлена схема реализации принципа функциональной ориентации эксплуатационных функций F , свойств C (ФОС) и технологических воздействий T . Здесь представлен принцип функциональной ориентации технологического воздействия (позиция 1), обеспечения свойств (ФОС) (позиция 2) в зависимости от особенностей действия эксплуатационной функции (позиция 3). Эти параметры можно моделировать на базе следующей системы отображений (преобразований):



$$\left. \begin{aligned} \varphi_{12} &: T \rightarrow C ; \\ \varphi_{23} &: C \rightarrow F ; \\ \varphi_{31} &: F \rightarrow T , \end{aligned} \right\}$$

где φ_{12} - отображение (преобразование) технологического воздействия T в свойства C (ФОС);

φ_{23} - отображение (преобразование) свойств C в зависимости от действия эксплуатационной функции F ;

φ_{32} - отображение (преобразование) эксплуатационной функции F в технологические воздействия T .

При обеспечении ФОС ГТД одной из важнейших характеристик авиационного двигателя является его ресурс

$C_k^g = R_k$, а именно установленный,

Рисунок 3 – Схема реализации принципа функциональной ориентации эксплуатационных функций F , свойств C (ФОС) и технологических воздействий T

межремонтный, назначенный и так далее. В этом случае, ресурс элементов структуры ГТД можно представлять следующими выражениями [6, 7]:

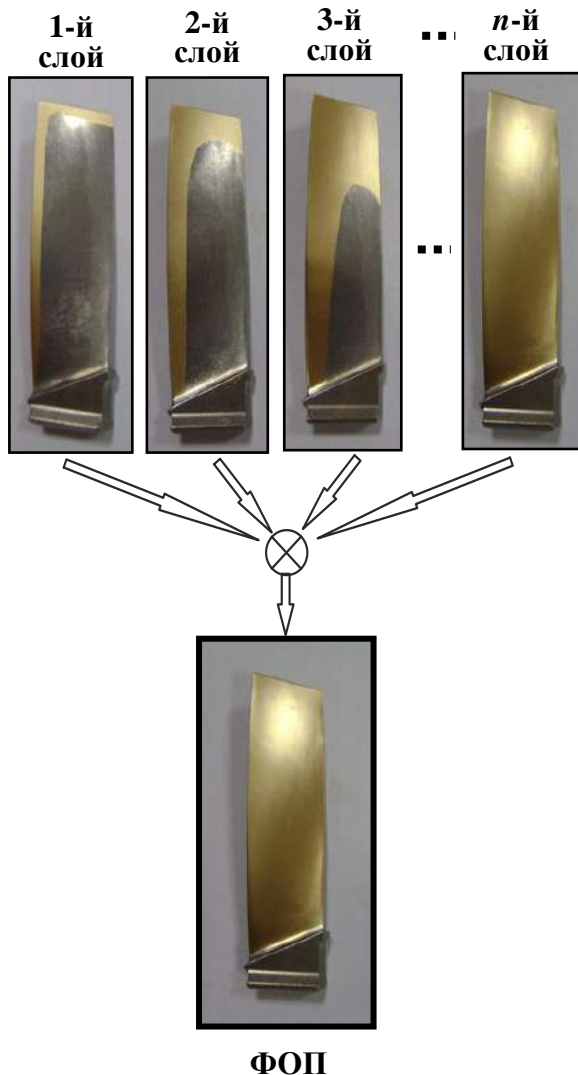
- при обеспечении равного ресурса элементов структуры с ФОС

$$R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_i = \dots = R_n = R ;$$

- при обеспечении кратного ресурса элементов структуры с ФОС

$$k_1 R_1 = k_2 R_2 = k_3 R_3 = \dots = k_i R_i = \dots = k_n R_n = R ;$$

- при обеспечении функционально-зависимого ресурса элементов структуры с ФОС



$$\left. \begin{aligned} R_1 &= f_1(R) ; \\ R_2 &= f_2(R) ; \\ R_3 &= f_3(R) ; \\ &\dots\dots\dots \\ R_i &= f_i(R) ; \\ &\dots\dots\dots \\ R_n &= f_n(R) , \end{aligned} \right\}$$

где R – общий ресурс ГТД;

В этом случае ФОС структурных элементов ГТД на каждом уровне r структуры формируются на базе следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} C_1^r &= f_1(F_1^r = F_{\max}^r) ; \\ C_2^r &= f_2(C_1^r, F_2^r) ; \\ C_3^r &= f_3(C_1^r, F_3^r) ; \\ &\dots\dots\dots ; \\ C_i^r &= f_i(C_1^r, F_i^r) ; \\ &\dots\dots\dots ; \\ C_n^r &= f_n(C_1^r, F_n^r) , \end{aligned} \right\}$$

где $C_1^r, C_2^r, C_3^r, \dots, C_i^r, \dots, C_n^r$ - множество физико-механических свойств соответствующего элемента структуры ГТД на уровне r ;

$F_1^r, F_2^r, F_3^r, \dots, F_i^r, \dots, F_n^r$ - множество эксплуатационных функций действующих на соответствующий элемент структуры ГТД на уровне r ;

Рисунок 4 – Схема композиции многослойного ФОП лопатки компрессора, состоящего из n слоев с ПКГ каждого

$C_i^r = f_i(C_1^r, F_i^r)$ - функциональная зависимость физико-механических свойств i -го элемента r -го уровня структуры ГТД от свойств и эксплуатационных воздействий на первый элемент структуры.

Можно отметить, что процесс реализации ФОС структурных элементов ГТД должен выполняться на базе предлагаемых принципов и комплексного многосвязного технологического процесса. Основные особенности выполнения данного процесса представлены в работах [7, 8, 10].

3. Полученные результаты и обсуждение работы

Можно отметить, что процесс обеспечения ФОС структурных элементов ГТД может выполняться различными методами с помощью различных структур технологического процесса. При этом ФОС структурных элементов могут иметь различные параметры в зависимости от требований и условий эксплуатации ГТД. Варианты формирования ФОС структурных элементов ГТД можно генерировать на базе их классификации, представленной в работах [5, 6]. Заметим, что обеспечение ФОС лопаток компрессора, турбины и свободной турбины, испытывающих переменное действие эксплуатационных воздействий, может выполняться с реализацией свойств следующих вариантов:

- с непрерывно изменяющимися ФОС;
- со ступенчато изменяющимися свойствами.

В работе выполнена реализация ступенчато изменяющихся ФОС рабочих лопаток компрессора на базе вакуумного многослойного функционально-ориентированного покрытия (ФОП), формируемого посредством нитрид титанового покрытия [11]. В этом случае ФОП переменной толщины формируется с помощью слоев равной толщины имеющих различный пространственный контур границ (ПКГ) каждого слоя (рис. 4), топологические параметры которого изоморфно определяются эксплуатационными особенностями их износа.

На рис. 4 представлена схема композиции многослойного ФОП лопатки компрессора, состоящего из n слоев с ПКГ каждого. В этом случае, процесс обеспечения ФОС выполняется на базе последовательной реализации многослойного ФОП в соответствии с группой особых принципов его ориентации [5], а именно принципов функциональной, топографической, количественной и структурной ориентации. На рис. 4 знак \otimes обозначает композицию слоев нитрид титанового покрытия с ПКГ каждого.

Для реализации ФОП рабочих лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117 разработан комплексный многосвязный технологический процесс формирования многослойного покрытия лопаток, работающих в условиях действия изменяющихся эксплуатационных функций [7, 8, 9, 10]. Можно отметить, что проведенные исследования позволили установить, что ФОП значительно повышают ресурс лопаток и обеспечивают заданный, требуемый или предельный ресурс компрессора ГТД в целом.

Выводы

Таким образом, в представленной работе выполнена разработка технологического обеспечения для реализации ФОС элементов ГТД, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных функций. Обеспечение ФОС структуре ГТД обеспечивают качественно новую совокупность эксплуатационных свойства высокие технико-экономические параметры эксплуатации. Обеспечение ФОС структуре ГТД выполняется на базе разработанных принципов и технологического подхода формирования эксплуатационных свойств.

Список литературы:

1. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
2. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
3. Богуслаев, В. А. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД. / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, П. Д. Жеманюк и [др.]. – Запорожье: Мотор Сич, 2005. - 559 с.
4. Михайлов, Д. А. Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций / Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. - Вып. 4 (50). - С. 126 - 131.
5. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
6. Михайлов, Д. А. Общий подход в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД на базе принципа единовременного полного износа покрытия / Д. А. Михайлов, А. В. Хандожко, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. - Вып. 4 (50). - С. 132 - 139.
7. Михайлов, А. Н. Структурный синтез комплексного многосвязного технологического процесса обработки лопаток компрессора газотурбинных двигателей с функционально-ориентированными покрытиями/ А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, В. А. Михайлов // Научные технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2020. - № 1 (103). – С. 40-48. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-2020-1-40-48>.
8. Михайлов, Д. А. Общий подход синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинных двигателей / Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, В. А. Михайлов, А. Н. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XXVII международной научно-техн. конференции в г. Севастополе 14-20 сентября 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020. - С. 235-253.
9. Михайлов, А. Н. Методика направленного поиска рациональных структурных вариантов процессов обработки лопаток ГТУ с учетом технологических связей / А. Н. Михайлов, А. П. Пичко, Д. А. Михайлов и [др.] // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XXVI международной научной-технической конференции в г. Севастополе 23-29 сентября 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. - С. 311-317.
10. Михайлов, Д. А. Общая методология синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя. / Д. А. Михайлов. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2021. - Вып. 1 (72). - С. 40 - 57.
11. Патент № 2718877 RU. С23С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов, Е. А. Шейко, А. П. Пичко, Н. С. Пичко, В. И. Сухарев. Заявка № 2018107164 от 26.02.2018. – Бюл. № 11, 15.04.2020. – 7 с.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF INCREASING THE RESOURCE OF PARTS OF GAS TURBINE ENGINES BASED ON PROVIDING FUNCTIONAL-ORIENTED PROPERTIES

Mikhaylov A.N., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mntk21@mail.ru

Mikhaylov D.A., Cand. Sc. (Engineering), Assistant professor, e-mail: mitia3@donapex.net

Donetsk National Technical University, st.Artem, 58, Donetsk, 283001, DPR

Don State Technical University, pl. Gagarin, Rostov-on-Don, 1344000, Russian Federation

Academy of Civil Protection, st. Rosa Luxemburg, 34 a, Donetsk, 283050, DPR

Abstract

The paper analyzes the features of the operation of a gas turbine engine, while it is established that uneven operational functions act on its structure, which lead to uneven and unequal wear and tear and destruction of its structural elements. To improve the operational properties of the main elements, parts, groups of parts and subsystems of a gas turbine engine operating under conditions of uneven operational influences, it is proposed to provide functionally oriented properties. These properties make it possible to significantly increase the operational properties of a gas turbine engine and to provide a given, required, or maximum operational potential. The technological features of increasing the resource of gas turbine engine parts based on the provision of functionally oriented properties are considered. To implement the functionally oriented properties of a gas turbine engine, a general approach has been developed for their formation on the basis of a complex multi-connected technological process.

Keywords: gas turbine engine, structure, functionally oriented properties, equal resource of elements, multiply connected technological process.

УДК 621.9

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ ОТВЕРСТИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗЦОМ НА РАДИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕ С ПЕРЕМЕННОЙ ШИРИНОЙ РЕЗАНИЯ

ОВЧАРЕНКО Александр Григорьевич, доктор техн. наук, профессор

РОМАШЕВ Александр Николаевич, кандидат техн. наук, доцент

СМИРНОВ Виталий Васильевич, кандидат техн. наук, доцент

ФИРСОВ Александр Максимович, кандидат техн. наук, доцент

Бийский технологический институт Алтайского государственного технического университета, 659305, Российская Федерация, г. Бийск, ул. имени Героя Советского Союза Трофимова, 27, e-mail: tmk@bti.secna.ru

Аннотация

В статье рассматривается проблема обеспечения точности формы при обработке отверстия с радиальной подачей и переменной шириной резания. Предметом исследования является технология обработки резцом ступенчатого отверстия, ось которого перпендикулярна оси вращения детали. Обработка таких отверстий может сопровождаться динамическими явлениями, связанными с колебаниями силы резания. Нормативно-техническая документация, как правило, не дает конкретных рекомендаций для таких случаев. Авторы предлагают методику анализа последствий перемещений режущей кромки резца, которая позволяет с помощью современных программных средств выявить ожидаемые численные значения отклонения от круглости. Эта методика позволяет на этапе проектирования подобрать режимы резания и поперечное сечение державки, обеспечивающие точность формы отверстия в пределах заданных допусков.

Ключевые слова: точение отверстия, переменная ширина резания, погрешности формы.

Введение

Точение уступов в отверстиях является довольно распространённым видом механической обработки и имеет свои особенности. Наиболее производительным способом обработки при этом является способ врезания инструмента с тангенциальной подачей, однако, если параметры внутренней ступени отверстия предполагают глубокое врезание, то, с учётом того, что габариты и траектории движения резца ограничены размерами отверстия, обработку необходимо производить за несколько проходов. Дополнительным фактором, влияющим на снижение технологичности обработки внутреннего уступа, является возможная неравномерная ширина реза, которая, например, проявляется при вытачивании уступов в пересекающихся отверстиях [1], оси которых располагаются под углом к главной оси тела вращения (рис. 1). В этом случае возникает ударная нагрузка, упругая деформация инструмента становится величиной переменной, зависящей от действующей силы резания (рис. 2), которая, в свою очередь, является функцией ширины реза. Циклические изменения тангенциальной F_t и радиальной F_r составляющих силы резания (в пределах одного оборота шпинделя) приводят, соответственно, к возникновению погрешностей формы поверхности отверстия, частности, к его отклонениям от круглости и цилиндричности. Усугубить ситуацию, кроме того, способен неравномерный износ режущей кромки резца. Здесь же имеет смысл рассматривать вариант структуры технологического перехода с использованием радиальной подачи.

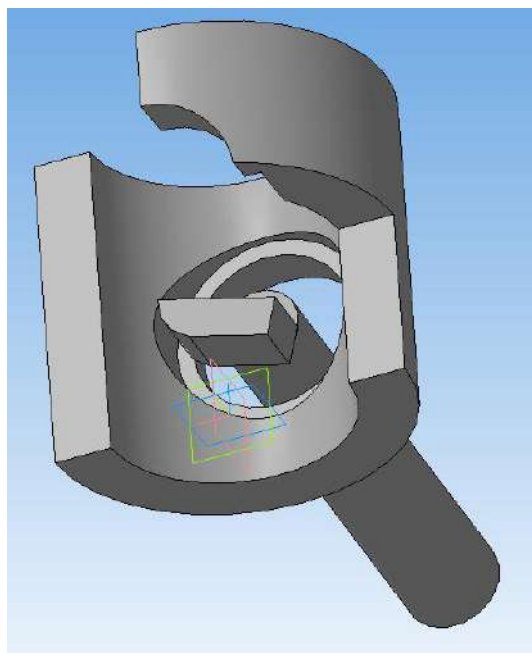


Рисунок 1 – Схема обработки отверстия с внутренним уступом при неравномерной ширине резания

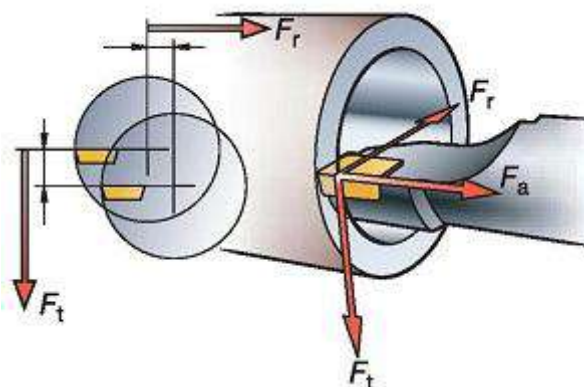


Рисунок 2 – Смещение режущей кромки резца от действия тангенциальной F_t и радиальной F_r составляющих силы резания

Проблемами качества обработки поверхностей с переменными параметрами резания занимались ряд отечественных и зарубежных исследователей. В частности, в работах [2-4] показывается, что в условиях переменной толщины среза наблюдается запаздывание сил резания относительно непрерывно изменяющейся величины припуска. Ряд авторов рассматривали вопросы моделирования динамики и управления режимами течения [5-8], исследовались термодинамические факторы, вопросы стабилизации процесса резания, подбора рациональных условий его осуществления с учётом проблем комплексной оптимизации распределения припусков и параметров механической обработки, а также принимая во внимание проблемы энергосбережения [9-13].

Практические рекомендации по осуществлению резания с переменной нагрузкой на инструмент даются в учебной и справочной литературе [14,15]. Однако многие вопросы теоретического и практического характера остаются не решенными. В настоящей работе рас-

сматривается методика анализа возникающих в описанном случае погрешностей формы, и предлагаются варианты их нивелирования.

Описание исследований

При переменной ширине резания b с радиальной подачей составляющие силы резания, радиальная F_r , тангенциальная F_t , определяются функциональными зависимостями:

$$\begin{aligned} F_r &= K_Y b^y, \\ F_t &= K_Z b^z. \end{aligned}$$

Здесь K_Y, K_Z – коэффициенты, показывающие суммарное влияние параметров режима резания на соответствующую компоненту силы резания при постоянных установленных условиях обработки. Осевая составляющая F_a равна нулю.

Характер зависимости силы $F = \sqrt{F_r^2 + F_t^2}$ резания от ширины резания b , мм (горизонтальная ось) при повороте заготовки на четверть оборота показан на рис. 3. При величине показателей степени близкой к единице эта зависимость довольно близка к линейной.

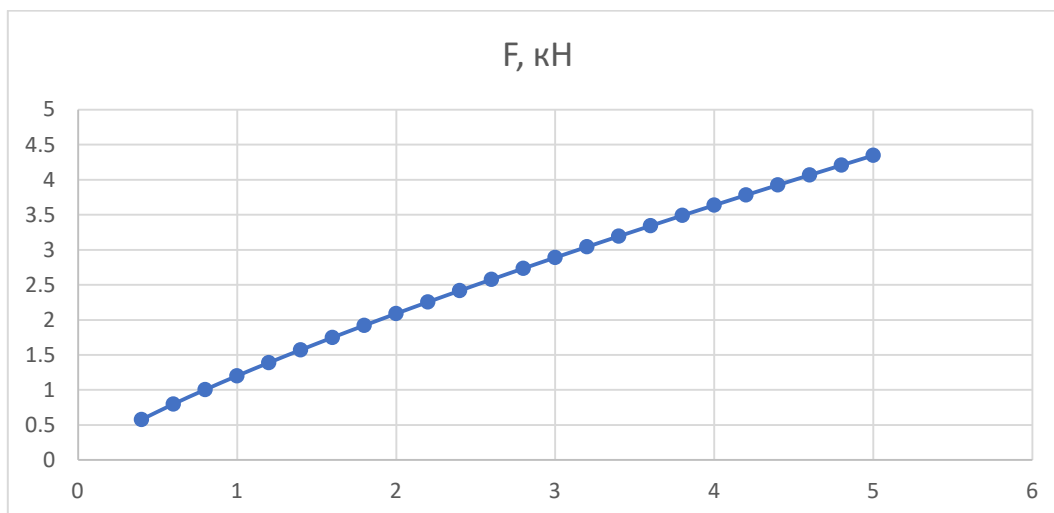


Рисунок 3 – Характер зависимости силы резания от ширины резания

График в полярных координатах, показывающий общий характер изменения силы резания за полный оборот заготовки, представленна рис. 4. Для расчёта деформаций реза можно воспользоваться известными формулами сопротивления материалов, рассматривая резец как стержень с жёсткой заделкой (рис.5). Максимальный прогиб реза f найдётся по формуле:

$$f = \frac{Fl^3}{3EI_x}, \quad (1)$$

где l – длина консольной части, E – модуль Юнга, I_x – осевой момент инерции (геометрическая характеристика сечения при изгибе)

Существенным недостатком расчёта по формуле (1) является то, что здесь не учитывается сложность геометрической формы реза.

Более совершенным способом определения прогиба является использование метода конечных элементов [16]. Возможность статического расчёта напряжённо-деформированного

состояния данным методом в настоящее время реализована во многих доступных студенту и инженеру пакетов прикладных программ. Порядок такого расчёта следующий:

- 1) создаётся твердотельная CAD-модель резца;
- 2) задаются закреплённые в резцедержателе поверхности, величина и направление силы, действующей на режущую кромку, назначаются свойства материала державки;
- 3) выполняется разбиение на конечные элементы;
- 4) выполняется расчёт;
- 5) выводятся и анализируются результаты расчёта.

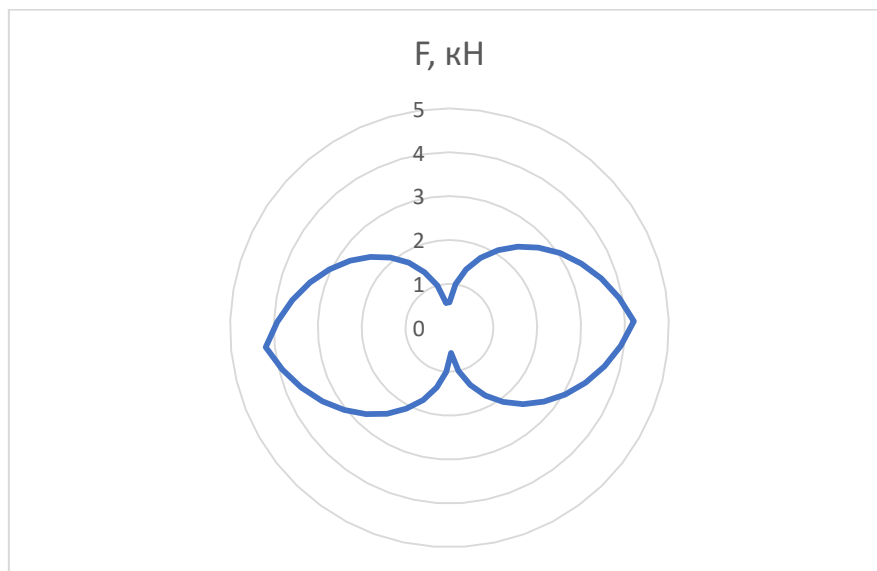


Рисунок 4 – Изменение силы резания в полярных координатах за полный оборот заготовки

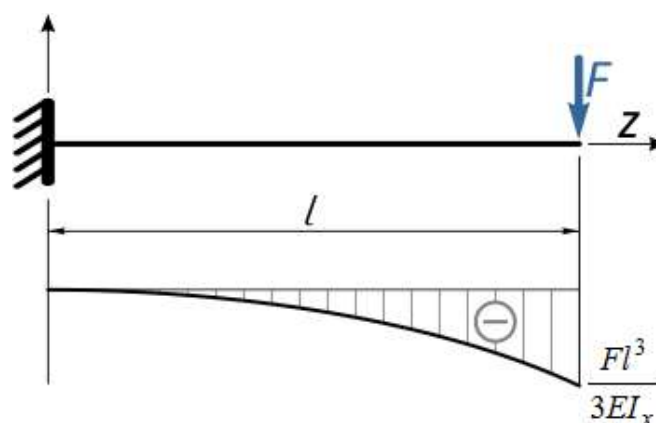


Рисунок 5 – Схема к расчёту прогиба резца по универсальной формуле сопротивления материалов

На рис. 6 приводится демонстрация расчёта методом конечных элементов резца для рассматриваемого случая обработки. В отличие от расчёта по формуле (1), в данном случае учитываются особенности конструкции инструмента и действующая сила, которая задаётся не сосредоточенной, а распределённой по режущей кромке инструмента.

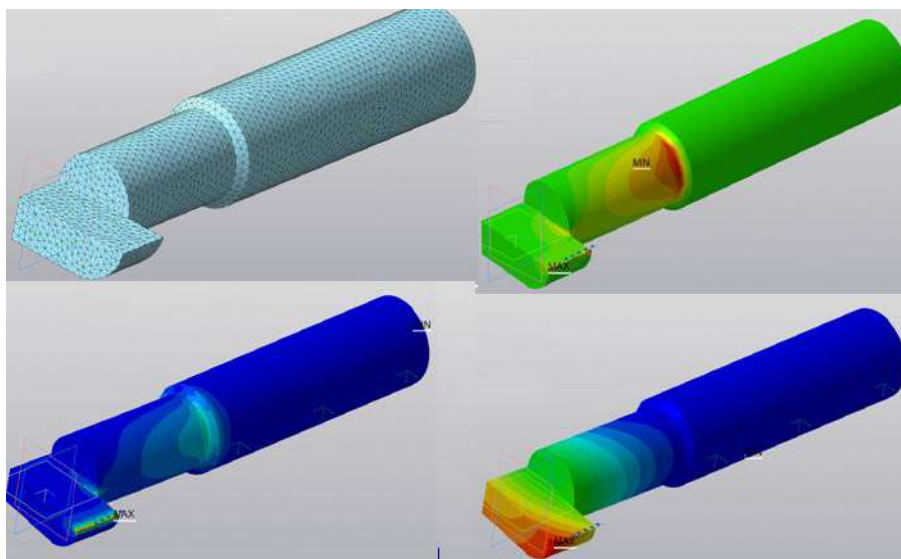


Рисунок 6 – Конечно-элементная модель резца для внутренней обработки, а также результаты расчёта деформаций напряжений и перемещений, возникающих от действия силы резания

Вследствие переменного прогиба резца возникает отклонение от круглости обрабатываемого отверстия, которое также можно оценить численно, собрав для этого все необходимые расчётные данные (рис.7). В рассматриваемом случае обеспечивается допуск отклонения отверстия от круглости в пределах девятого качества точности.

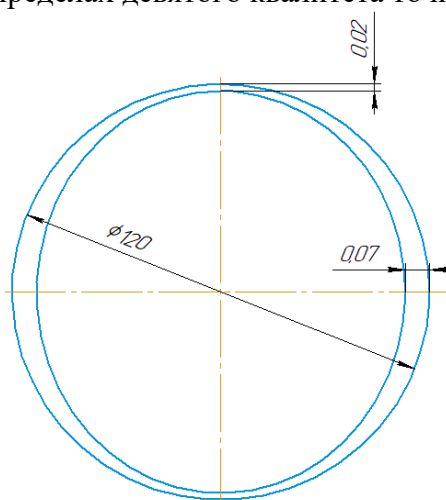


Рисунок 7 – Схема возникновения отклонения от круглости обрабатываемого отверстия и его численная оценка: 1 – номинальная форма отверстия, 2 – ожидаемая форма

Результаты и обсуждение

На основании условий точения отверстия на радиальной подаче с переменной шириной резания, разработана методика анализ возникающих при данном виде обработке погрешностей формы отверстия (отклонение от круглости). Алгоритм применения методики включает в себя выполнение следующих основных этапов:

- 1) ввод данных о свойствах материала, режимах обработки и характере изменения ширины резания;
- 2) вычисление зависимости для переменной величины силы резания;
- 3) расчёт на жёсткость (методом конечных элементов) державки резца;
- 4) вычисление отклонений формы обрабатываемого отверстия.

Данная методика может быть реализована в технологических, в том числе студенческих проектах. При проектном расчёте она позволяет выявить численные значения отклонения формы, возникающие при выполнении технологической операции, и предусмотреть соответствующие корректирующие действия, например, изменить структуру технологического перехода или провести мероприятия по увеличению жёсткости технологической системы (усилить державку резца). При проверочном расчёте с помощью данной методики можно оценить, является ли получение брака на анализируемой операции следствием недостаточной жёсткости технологической системы.

Выводы

1. Точение внутренних уступов в отверстиях часто нельзя признать технологичным, особенно в случаях, когда на поверхность прерывистая или ширина резания переменная. При растачивании таких отверстий уменьшается ресурс стойкости режущего инструмента, возникают отклонения формы, а также проблемы с микрогеометрией обрабатываемой поверхности.
2. Оценка условий резания в сочетании с вычислительным анализом позволяет прогнозировать жёсткость державки резца, и, следовательно, величину и характер отклонений формы.
3. Предложенная методика анализа растачивания внутренних уступов с переменной шириной резания позволяет производить проектный и проверочный расчёты погрешности обработки отверстий, связанной с жёсткостью технологической системы.

Список литературы

1. Фирсов А.М., Овчаренко А.Г., Ромашев А.Н., Смирнов В.В., Камардин А.И. Определение условий обработки отверстий с прерывистыми поверхностями // Инновации в машиностроении: материалы X Междунар. науч.-практ. конф. - Кемерово: Изд-во Кузбасский технический университет имени Т.Ф. Горбачева, – 2019. – С. 116-122.
2. Ташлицкий Н.И. Явление запаздывания усилий при прерывистом резании с переменной толщиной среза // Вестник машиностроения. – 1969. – № 4. – С. 67-68.
3. Кулик В.И. О смещении максимума силы резания при тангенциальной обработке // Вестник тихоокеанского государственного университета. – 2007. – № 1 (4). – С. 89-102.
4. Скиба В.М. Особенности проектирования технологического процесса попутного тангенциального точения // Известия вузов. Машиностроение. – 2015. – №8 (665). – С. 58-64.
5. Виноградов М.В., Игнатъев А.А., Сигитов Е.А., Клепова И.В. Моделирование динамических процессов в приводе подачи токарного модуля в режиме стружкодробления // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – №2 (22). – С.149-162.
6. Генералов Л.К., Мочалова М.И., Генералов А.Л. Взаимодействие модели процесса резания и регулятора в системе управления точностью обработки // Наука, техника и образование. – 2016. – №2 (20). – С.20-23.
7. Бржозовский Б.М., Мартынов В.В. Динамический мониторинг и оптимизация процессов механической обработки // СТИН. – 2002. – №1. – С.12-15.

8. Кабалдин, Ю.Г. Управление динамическими процессами в технологических системах механообработки на основе искусственного интеллекта/ Кабалдин Ю.Г., Биленко С.В., Серый С.В. - Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО "Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т", 2003 – 201 с.
9. Кудряшов Е.А., Крылов И.С., Хижняк Н.А. О рациональных условиях точения конструктивно сложных поверхностей деталей // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2018. – № 1 (76). – С. 34-44.
10. Павлов Е.В. Стабилизация процессов чистовой лезвийной обработки прерывистых поверхностей синтетическими инструментальными материалами: Монография. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2018. – 153 с.
11. Venkata Rao R. Modeling and optimization of machining processes // Advanced modeling and optimization of manufacturing processes: International Research and Development. Springer, London, – 2011. pp 55–175
12. He, K.; Hong, H.; Tang, R.; Wei, J. Analysis of multi-objective optimization of machining allowance distribution and parameters for energy saving strategy // Sustainability. – 2020, 12, – p.638.
13. Xiaonan Wu, Wei Dai, Research on machining allowance distribution optimization based on processing defect risk // Procedia CIRP, – № 56, – 2016, – p 508-511.
14. Высокопроизводительная обработка металлов резанием / АВ SandvikCoromant, ОАО «Сандвик-МКТС». – М.: Полиграфия, 2003. – 301 с.
15. Garant. Cutting Pilot Hoffmann Group. Справочник по обработке резанием. ФРГ. 2009. – 842 с.
16. Smirnov, V. V. Numerical models of heat-transfer processes in elements of technological systems of treatment by cutting // Вестник молодых ученых. Серия: Технические науки. – 2001. – No 7. – P. 85-89.

ACCURACY ANALYSIS OF THE HOLE SHAPE DURING CUTTING WITH A CUTTER WITH RADIAL FEED AND VARIABLE CUTTING WIDTH

Ovcharenko A. G., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: tmk@bti.secna.ru

Romashev A.N., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail:alniro@yandex.ru

Smirnov V. V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: smirnov@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

In the article, the authors consider the problem of ensuring the accuracy of the shape when machining a hole with a radial feed and a variable cutting width. The subject of research is the technology of machining a stepped hole with a cutter, the axis of which is perpendicular to the axis of rotation of the part. The machining of such holes can be accompanied by dynamic phenomena associated with fluctuations in the cutting force. Normative and technical documentation, as a rule, does not provide specific recommendations for such cases. The authors propose a method for analyzing the consequences of displacements of the cutting edge of the cutter, which allows using modern software to identify the expected numerical values of the deviation from roundness. This technique allows at the design stage to select the cutting conditions and the cross-section of the holder, which ensure the accuracy of the hole shape within the specified tolerances.

Keywords: hole turning, variable cutting width, shape errors.

УДК 621.9.011

ОЦЕНКА ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА БРАЖ 10, ПОЛУЧЕННОГО DMD-МЕТОДОМ, ПО КРИТЕРИЯМ СИЛЫ РЕЗАНИЯ И ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*АРДАШЕВ Дмитрий Валерьевич¹, доктор техн. наук, профессор,
e-mail: ardashevdy@susu.ru*

*ГУЗЕЕВ Виктор Иванович, доктор техн. наук, профессор,
e-mail: guzeevvi@susu.r*

*ДЮРЯГИН Александр Анатольевич¹, аспирант,
e-mail: s.dyuryagin@mail.ru*

¹Южно-уральский государственный университет, 454080,
Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76

Аннотация

В работе рассмотрены результаты экспериментального исследования обрабатываемости материала БраЖ 10, полученного с использованием DMD-метода (Direct Metal Deposition).

В результате проведения эксперимента были получены данные, необходимые для дальнейшей обработки. Основная задача опытов заключалась в регистрации силы резания и измерении шероховатости обработанной поверхности при различных подачах, что является важнейшим этапом для установления их взаимосвязи. Установлена взаимосвязь силы резания при фрезеровании и шероховатости обработанной поверхности от подачи, что позволило определить коэффициент относительной обрабатываемости материала БраЖ 10, полученного DMD-методом.

Полученные значения коэффициента относительной обрабатываемости могут быть применены при проектировании операции механической обработки такого материала для назначения режимов резания.

Ключевые слова: аддитивные технологии, процесс фрезерования, обрабатываемость, коэффициент относительной обрабатываемости, сила резания, шероховатость, БраЖ 10.

Введение

DMD – это одна из новых наукоемких технологий, относящаяся к группе аддитивных, суть которой заключается в прямом осаждении металлических частиц из газопорошковой струи [1-4]. Применение данной технологии позволяет изготавливать генеративные детали достаточно сложной формы, при этом появляется возможность отказа от трудоемких заготовительных процессов. Кроме того, существует возможность изготавливать гибридные заготовки, состоящие из комбинации материалов, и наносить многокомпонентные покрытия, обладающие специальными свойствами, такими как жаростойкость, коррозионностойкость, повышенная прочность, износостойкость и т.д. [5-6].

Таким образом, перспектива к переходу от традиционного заготовительного производства к современным аддитивным технологиям состоит в том, что данный метод позволяет изготавливать такие заготовки, конфигурация которых приближена к чертежу готовой детали [7], что в свою очередь позволяет сократить время ее обработки, повысить производи-

тельность и снизить затраты на режущий инструмент. Обработка резанием таких заготовок будет производиться с минимально необходимыми припусками [8].

Механическая обработка заготовок, полученных таким малоизученным способом, требует назначения наиболее рациональных режимов резания с учетом специфики физических и механических свойств материала. Справочная литература не содержит в себе такую информацию, поэтому режимы в настоящее время для обработки таких материалов назначаются методом подбора. Для рационального назначения режимов резания при проектировании операции и формирования справочной базы необходимо проведение достаточно большого количества экспериментальных исследований, включающих замеры параметров процесса формообразования (сила резания, износ инструмента, шероховатость обработанной поверхности и т.д.) при варьировании технологическими условиями (подача инструмента, скорость, глубина резания, геометрия инструмента и т.д.).

В последнее время вопрос по обработке генеративных материалов получает все более широкое распространение [9-12], что свидетельствует о заинтересованности машиностроительной отрасли в преимуществах, характерных для данного вида заготовок. Однако, по-прежнему отсутствуют общепризнанные рекомендации по обработке и назначению режимов для лезвийной обработки таких материалов.

В работах [13-15] проводится сравнительный анализ параметров процесса резания сплава Inconel 718 на основе никеля, который широко применяется в авиастроении. Производится обработка двух заготовок, одна из которых получена DMD-методом, другая – методомковки. Установлено, что при одинаковых параметрах резания прочность наплавленной заготовки значительно выше поковки.

В работе [16] проведена оценка обрабатываемости карбида вольфрама, полученного методом лазерного спекания. В качестве эталонного материала принимается закаленная сталь X12MФ. Оценка обрабатываемости производится путем сравнения силы резания, возникающей при фрезеровании образцов. Здесь, как и в большинстве работ по данному направлению, оценка обрабатываемости носит лишь качественный характер, что не позволяет в итоге определить численный показатель или модель, на основании которых можно разработать рекомендации по обработке генеративных материалов.

Таким образом, исследование обрабатываемости наплавленных заготовок активно и широко изучается во всем мире, разработка рекомендаций для обработки новых материалов, полученных DMD-методом, является актуальной задачей для современного машиностроительного производства.

Цель работы заключается в оценке обрабатываемости фрезерованием наплавленного материала, используя показатели силы резания и качества обработанной поверхности.

Для достижения цели решаются следующие **задачи**:

1 Измерить величину составляющих силы резания, возникающих в процессе обработки сплава БрАЖ 10, а также шероховатость обработанной поверхности, установить их функциональную взаимосвязь с подачей на зуб.

2 Определить коэффициент относительной обрабатываемости материала БрАЖ 10 по показателям силы резания и шероховатости обработанной поверхности.

Описание экспериментального исследования

Объектом экспериментального исследования является процесс фрезерования. Предмет исследования – выходные параметры процесса. Основными методами, применяющимися для достижения поставленной цели, являются эксперимент, измерение и регрессионный анализ экспериментальных данных.

Эксперимент проводился на фрезерном станке с ЧПУ ГФ2171С5 с применением концевых фрез диаметром 8 мм из материала Р6М5. Согласно справочникам [17-18] были выбраны параметры процесса формообразования, представленные в таблице 1. Фрезеруемые образцы представляют собой диски. Один образец из материала сталь 45, другой – из стали 40Х, на который наплавлен слой материала БрАЖ 10.

Таблица 1 – Параметры процесса формообразования

Подача S_z , мм/зуб	Скорость резания V , м/мин	Глубина резания t , мм	Диаметр инструмента D , мм	Число зубьев z , шт
0,02	18	0,5	8	3
0,04				
0,06				
0,10				

Для измерения силы резания образцы в виде дисков устанавливались на динамометр Kistler 9257В. Динамометр в процессе обработки образцов передает возникающий электрический сигнал на прибор Kistler 5070А, в котором происходит разложение полученного сигнала на три составляющие силы резания. Обработка полученных значений сил резания производится в программном обеспечении DynoWare. Для измерения шероховатости поверхности применяется профилометр АБРИС-ПМ7.

Результаты и обсуждение

1 Сила резания

Результаты эксперимента в виде диаграмм составляющих силы резания при обработке стали 45 и БрАЖ 10 представлены в таблицах 2 и 3 соответственно.

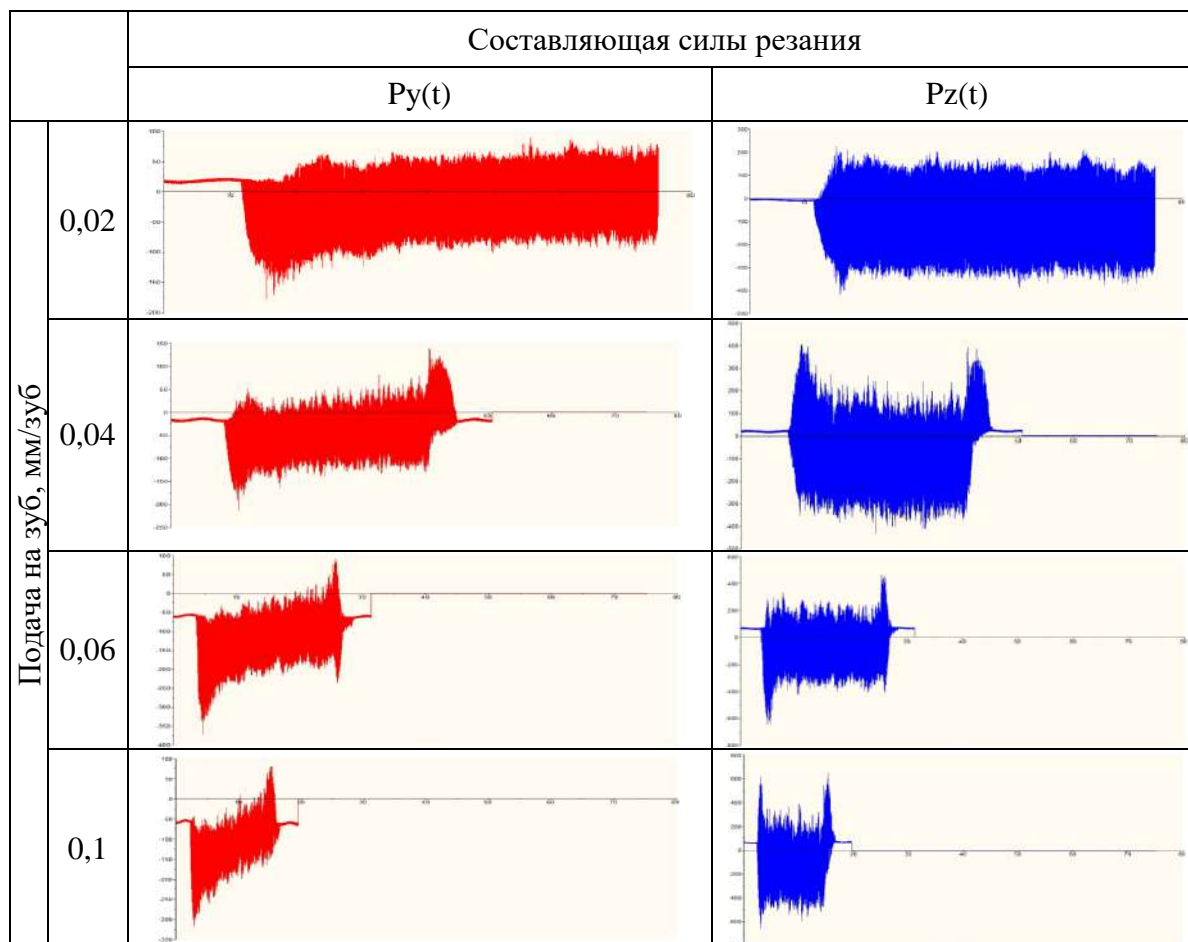
Для корректного определения коэффициента относительной обрабатываемости составляющие силы резания измерялись при фрезеровании заготовок из стали 45 и БрАЖ 10. Образцы из стали и бронзы обрабатывались с одинаковыми режимами резания. Из графиков видно, что наблюдается тенденция к увеличению силы резания при соответствующем увеличении подачи.

Диаграммы составляющих силы резания, возникающие при фрезеровании БрАЖ 10, отличаются неравномерностью с течением времени. Периодически изменяющийся характер сил свидетельствует о том, что на поверхности образца имеются участки с различной концентрацией железа и меди [8, 19], то есть участки с различной твердостью, что вызывает уменьшение или увеличение силы резания.

Оценка обрабатываемости проводилась значению по составляющей силы резания R_{uz} , которая используется для расчета оправки на изгиб. Для этого по полученным экспериментальным значениям составляющих R_y и R_z находили их максимальные значения. Найденные значения представлены в таблице 4.

Согласно методике, представленной в [20], проводился регрессионный анализ с целью установления зависимости, по которой изменяется величина силы резания с изменением подачи.

Таблица 2 – Диаграммы составляющих силы резания при обработке стали 45



По полученным экспериментальным значениям силы резания, были найдены зависимости силы резания от подачи на зуб при обработке стали 45 (1) и БрАЖ 10 (2). По расчетам, проведенным в соответствии с методикой, использующей критерий Фишера, установлено, что коэффициенты регрессии являются значимыми.

$$y = 4782,83 \cdot Sz + 185,49 \quad (1)$$

$$y = 1044,23 \cdot Sz + 588,44 \quad (2)$$

На основании этого коэффициент относительной обрабатываемости по показателю силы резания определяются по формуле (3):

$$K_{Pyz} = \frac{4782,83 \cdot Sz + 185,49}{1044,23 \cdot Sz + 588,44} \quad (3)$$

Таблица 3 – Диаграммы составляющих силы резания при обработке БрАЖ 10

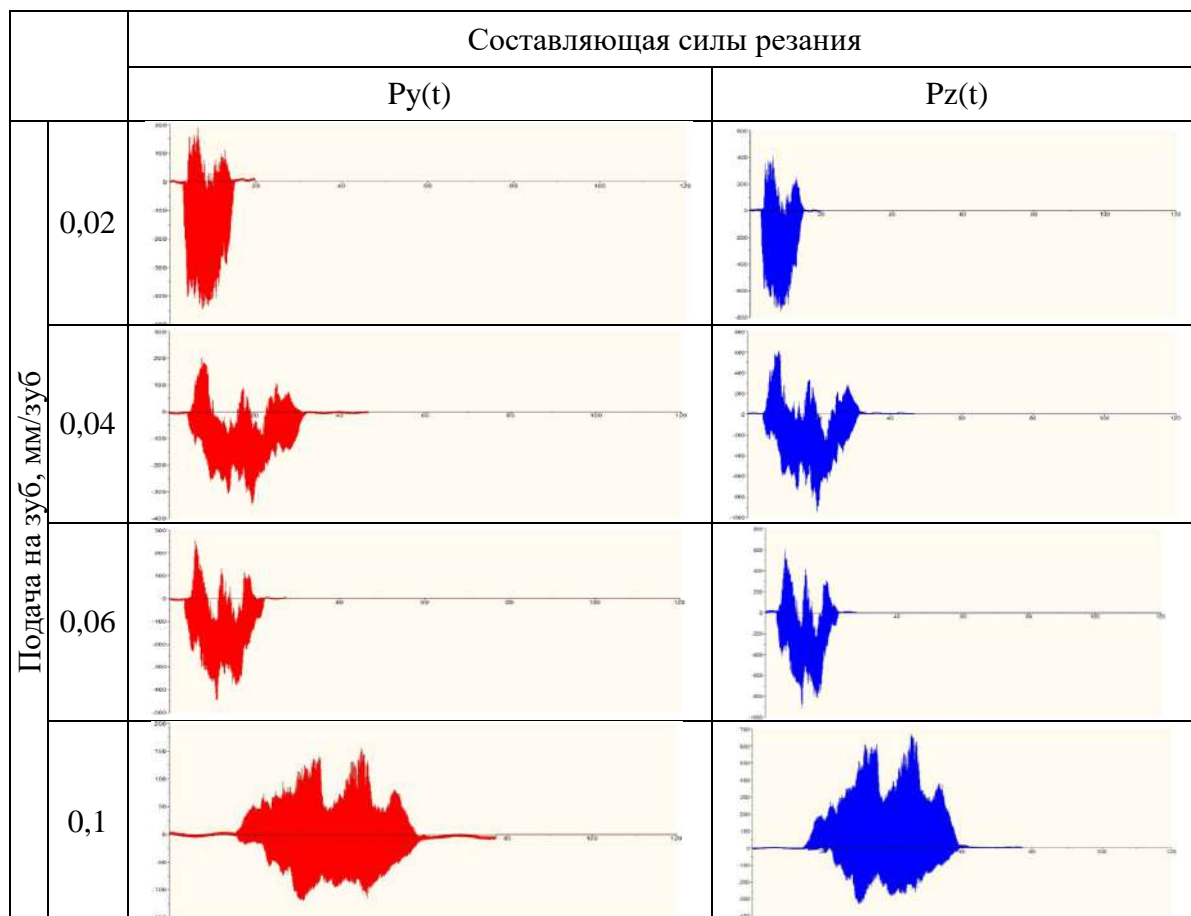


Таблица 4 – Максимальные значения составляющих силы резания

Материал заготовки	Подача Sz, мм/зуб	Составляющая силы резания		
		P_y , Н	P_z , Н	P_{yz} , Н
Сталь 45	0,02	88,87	226,59	243,39
	0,04	138,95	403,41	426,67
	0,06	90,24	464,51	473,19
	0,1	80,41	645,97	650,95
БрАЖ 10	0,02	187,13	568,14	598,17
	0,04	200,78	609,86	642,06
	0,06	251,31	605,53	655,61
	0,1	156,37	669,62	687,63

2 Шероховатость обработанной поверхности

Вторым критерием, по которому оценивалась обрабатываемость, является шероховатость. Шероховатость обработанной поверхности при каждой из подач измерялась трижды. Полученные значения микронеровностей представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Шероховатость обработанной поверхности

Материал заготовки	Подача Sz, мм/мин	Шероховатость Ra, мкм		
		1	2	3
Сталь 45	0,02	6,05	6,70	6,19
	0,04	9,83	9,24	9,86
	0,06	10,37	10,79	10,89
	0,1	11,92	11,32	11,82
БрАЖ 10	0,02	3,39	3,59	3,06
	0,04	3,67	3,75	3,89
	0,06	4,19	3,95	3,70
	0,1	4,13	4,31	4,17

Аналогичным образом был проведен регрессионный анализ, по результатам которого были получены зависимости шероховатости обработанной поверхности от подачи на зуб для стали 45 (4) и БрАЖ 10 (5). По критерию Фишера данные уравнения регрессий являются значимыми.

$$y = 61,06 \cdot Sz + 6,22 \quad (4)$$

$$y = 10,06 \cdot Sz + 3,26 \quad (5)$$

На основании этого коэффициент относительной обрабатываемости по показателю качества обработанной поверхности определяются по формуле:

$$K_{pyz} = \frac{61,06 \cdot Sz + 6,22}{10,06 \cdot Sz + 3,26} \quad (6)$$

3 Коэффициент относительной обрабатываемости

По экспериментальным данным при помощи регрессионного анализа были получены математические модели, по которым можно определить обрабатываемость материала БрАЖ 10, полученного DMD-методом, для используемых в исследовании условий обработки. Значения коэффициента относительной обрабатываемости для различных подач представлены в таблице 6. Из рассчитанных значений коэффициента видно, что по показателю силы резания материал БрАЖ 10 обрабатывается хуже, чем сталь 45, а по качеству обработанной поверхности – лучше. То есть при фрезеровании материала БрАЖ10 при прочих равных условиях требуется приложить сил больше, чем при обработке стали 45. А при обработке с одинаковыми силами резания величина шероховатости стали 45 превосходит БрАЖ10.

Таким образом, учитывая полученные выражения для определения коэффициента относительной обрабатываемости, при обработке материала БрАЖ 10 можно пользоваться режимами резания, предназначенными для стали 45. При этом необходимо умножать значение подачи на соответствующий ей коэффициент относительной обрабатываемости. Однако также следует учитывать, какой из показателей процесса резания является лимитирующим.

Таблица 6 – Значения коэффициента относительной обрабатываемости

Подача S_m , мм/зуб	Коэффициент относительной обрабатываемости	
	K_{Pyz}	K_{Ra}
0,02	0,46	2,15
0,04	0,59	2,36
0,06	0,73	2,56
0,08	0,84	2,73
0,1	0,96	2,89

Согласно выражению (6) для нахождения коэффициента относительной обрабатываемости сведем в таблицу рекомендуемые значения подачи для ряда значений шероховатости при фрезеровании материала БрАЖ 10 (см. табл. 7). Коэффициент относительной обрабатываемости по показателю силы резания можно применять для проверки подачи по допустимой жесткости станка, используя значения для стали 45.

Таблица 7 – Рекомендуемые значения подачи

Шероховатость R_a , мкм, до	Подача S_z , мм/зуб
4,0	0,07
5,0	0,17
6,3	0,30
8,0	0,47
10,0	0,66

Выводы

1 Силы резания, возникающие при фрезеровании материала БрАЖ 10, полученного DMD-методом, имеют неравномерный характер проявления во времени, что связано с неоднородностью поверхностного слоя заготовки.

2 Влияние подачи на шероховатость обработанной поверхности носит слабовыраженный характер.

3 Разработаны выражения для нахождения коэффициента относительной обрабатываемости по критериям силы резания и шероховатости обработанной поверхности. На основании полученной математической модели рассчитаны значения коэффициента для различных подач.

4 Определены рекомендуемые значения подач, соответствующие величинам шероховатости обработанной поверхности для использования при проектировании операции фрезерования материала БрАЖ 10.

Список литературы

1. Pinkerton A.J. Laser direct metal deposition: theory and applications in manufacturing and maintenance // *Advances in Laser Material Processing*. – 2010. – pp. 461–491. – doi: 10.1533/9781845699819.6.461.

2. Dalae, M.T. Experimental and numerical study of the influence of induction heating process on build rates Induction Heating-assisted laser Direct Metal Deposition (IH-DMD) / M.T. Dalae, L. Gloor, C. Leinenbach, K. Wegener // *Surface and Coating Technology*. – 2020. – Vol. 384. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.125275.

3. Aghili, S.E. Investigation of powder fed laser cladding of NiCr-chromium carbides singlesubstrate / S.E. Aghili, M. Shamanian // *Optics & Laser Technology*. – 2019. – Vol. 119. – doi: 10.1016/j.optlastec.2019.105652.
4. Leyens, C. Innovations in Laser cladding and direct laser metal deposition / C. Leyens, E. Beyer // *Laser Surface Engineering*. – 2015. – pp. 181-192. – doi: 10.1016/B978-1-78242-074-3.00008-8.
5. Yang, Y.H. Microstructure evolution and protective properties of TaN multilayer coatings / Y.H. Yang, F.B. Wu // *Surface and Coating Technology*. – 2006. – Vol. 308. – pp. 108–114. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.05.091.
6. Contreras, E. CrVN/TiN nanoscale multilayer coatings deposited by DC unbalanced magnetron sputtering / E. Contreras, Y. Galindez, M.A. Rodas, G. Bejarano, M.A. Gomez // *Surface and Coating Technology*. – 2017. – Vol. 332. – pp. 214–222. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.07.086.
7. Boisseliera, D. Improvement of the laser direct metal deposition process in 5-axis configura-tion / D. Boisseliera, S. Sankarea, T. Engelb // *Physics Procedia*. – 2014. – Vol. 56. – pp. 239–249. – doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.168.
8. Ардашев, Д.В. Экспериментальное исследование дефектного слоя на заготовках, выращенных DMD-методом / Д.В. Ардашев, А.А. Дюрягин, Д.М. Галимов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 6–17. – doi: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-6-17.
9. Oyelola, O. Machining of Additively Manufactured Parts: Implications for Surface Integrity / O. Oyelola, P. Crawforth, R. M'Saoubi, A.T. Clare // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 45. – pp. 119–122. – doi: 10.1016/j.procir.2016.02.066.
10. Bourell, D.L. Post-Processing of Additively Manufactured Metal Parts / D.L. Bourell, W. Frazier, H. Kuhn, M. Seifi // *Additive Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 24. – doi: 10.31399/asm.hb.v24.9781627082907.
11. Дранков, А.В. Изготовление деталей РКТ из отечественного порошка нержавеющей стали // *Аддитивные технологии*. – 2019. – N 2. – С. 50–55.
12. Das, S. Producing Metal Parts with Selective Laser Sintering/Hot Isostatic Pressing // *JOM*. – 1998. – pp. 17–20. – doi: 10.1007/s11837-998-0299-1.
13. Calleja, A. Inconel 718 superalloy machinability evaluation after laser cladding additive manufacturing process / A. Calleja, G. Urbikain, H. Gonzalez, I. Cerrillo, R. Polvorosa, A. Lamikiz // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 97. – pp. 2873–2885. – doi: 10.1007/s00170-018-2169-5.
14. Ostra, T. Analysis of the Machining Process of Inconel 718 Parts Manufactured by Laser Metal Deposition / T. Ostra, U. Alonso, F. Veiga, M. Ortiz // *Materials*. – 2019. – Vol. 12. – doi: 10.3390/ma12132159.
15. Devillez, A. Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools. / A. Devillez, F. Schneider, S. Dominiak, D. Dudzinski, D. Larrouquere. // *Wear* – 2007. – Vol. 262. – pp. 931–942. doi: 10.1016/j.wear.2006.10.009.
16. Twardowski, P. Machining Characteristics of Direct Laser Deposited Tungsten Carbide / P. Twardowski, S. Wojciechowski // *IntechOpen* – 2012. – P. 19. – doi: 10.5772/51439.
17. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Часть 2. – Москва: Экономика, – 1990. – 472 с.
18. Локтев, А.Д. Общемашиностроительные нормативы режимов резания: справочник в 2-х т.: Т. 1 / А.Д. Локтев, И.Ф. Гушин, В.А. Батуев и др. – М.: Машиностроение. – 1991. – 640 с.

19. Бурова Д.Н., Цебрук И.С., Классен Н.В. Исследования и применения влияния магнитного поля на систему «железо-медь-вода» // XVII Всероссийская с международным участием школа-семинар по структурной макрокинетике для молодых ученых имени академика А.Г. Мержанова. – Черногоровка, 2019. – С. 134-136. – doi: 10.24411/9999-004A-2019-10045.

20. Шаламов, В.Г. Вероятностно-статистические методы в машиностроении / В.Г. Шаламов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – 152 с.

ESTIMATION OF MACHINABILITY OF THE MATERIAL CuAl10Fe4 OBTAINED BY DMD-METHOD ON THE CRITERIA OF THE CUTTING FORCE AND ROUGHNESS OF THE PROCESSED SURFACE

Ardashev D.V.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: ardashev dv@susu.ru

Guzeev V.I., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: guzeev vi@susu.ru

Dyuryagin A.A.¹, PHD student (Engineering), e – mail: s.dyuryagin@mail.ru

¹ South Ural State University, 76 Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation

Abstract

The paper considers the results of an experimental study of the machinability of the CuAl10Fe4 material obtained using the DMD method (Direct Metal Deposition).

As a result of the experiment, the data necessary for further processing were obtained. The main task of the experiments was to register the cutting force and measure the roughness of the machined surface at various feeds, which is the most important stage for establishing their relationship. The relationship between the cutting force during milling and the roughness of the machined surface from the feed was established, which made it possible to determine the coefficient of relative machinability of the CuAl10Fe4 material obtained by the DMD method.

The obtained values of the coefficient of relative machinability can be used in the design of the operation of machining such a material to assign cutting conditions.

Keywords: additive technologies, milling process, machinability, coefficient of relative machinability, cutting force, roughness, CuAl10Fe4.

УДК 621.923.1 534.612.2

АНАЛИЗ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ЗВУКА ПРОЦЕССА КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

*АРДАШЕВ Дмитрий Валерьевич¹, доктор техн. наук, профессор,
e-mail: ardashevdy@susu.ru
ЖУКОВ Александр Сергеевич¹, аспирант,
e-mail: 89127773160@mail.ru*

¹Южно-уральский государственный университет, 454080,
Российская Федерация, г. Челябинск, пр. Ленина, 76

Аннотация

В работе проводится анализ экспериментальных данных по исследованию характеристик звуковой волны, возникающей в процессе шлифования, и обсуждаются его результаты. Кратко описан эксперимент. Рассмотрены полученные осциллограммы звуковых колебаний процесса шлифования, приведены результаты спектрального анализа. Проведено качественное сравнение диаграмм звука, записанного при холостой работе станка и при обработке образцов на разных режимах. Исследован спектральный состав звука при шлифовании, выявлены основные закономерности от скорости врезной подачи и от продолжительности обработки. В заключении статьи приведены выводы.

Ключевые слова: амплитудо-частотная характеристика, акустический анализ звука, спектральный анализ звука, процесс шлифования.

Введение

В работах Г.Б. Лурье [1–4] утверждается, что амплитуда колебаний, возникающих в результате процесса резания и претерпевающих рост по мере затупления шлифовального круга (ШК), могут служить критерием для оценки стойкости ШК. Помимо этого, вопросами динамики колебательных процессов, генерируемых процессом резания при шлифовании, занимались В.А. Кудинов [5], Н.Т. Тодоров [6], М. Вильнер [7], О. Гельфельд [8], Landberg [9], E. Salje [10] и др. В указанных работах авторы приходят к выводу, что в процессе шлифования меняется спектральный характер испускаемого звука: появляются новые гармоники, отсутствующие до начала обработки, происходит увеличение их амплитуд, уровень значений которых определяется режимами резания и характеристикой применяющегося инструмента. Можно утверждать, что применение спектрального анализа звука с целью установления зависимостей между звуковыми характеристиками и режимами резания позволит создать предпосылки для разработки косвенного критерия оценки работоспособности ШК.

Таким образом, **целью** представленной работы является установление качественных зависимостей процесса шлифования с амплитудо-частотной характеристикой звуковых явлений процесса шлифования, а также с частотным спектром в характерные этапы обработки.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**: 1) планирование и проведение экспериментального исследования; 2) исследование осциллограмм холостого и рабочего циклов шлифования; 3) проведение спектрального анализа звуковой характеристики для различных режимов шлифования.

Описание экспериментального исследования

Объектом экспериментального исследования является процесс круглого наружного врезного шлифования (КНВШ). Предмет исследования – акустические характеристики процесса.

Эксперимент (см. рисунок 1) был поставлен на круглошлифовальном станке 3М151Ф2, с применением шлифовального круга 1 600×50×305 25А F46 L 6 V 50 2кл ГОСТ Р 52781–2007.

Режимы обработки:

- скорость вращения круга $V_k = 50$ м/с;
- скорость вращения заготовки в центрах $v_k = 25$ м/мин;
- ширина шлифования $l_{ш} = 10$ мм;
- скорость радиальной подачи круга $V_{спад}$ в зависимости от проводимого опыта составляет 0,2; 0,3; 0,5; 0,8 мм/мин;
- время обработки $t = 5$ мин.

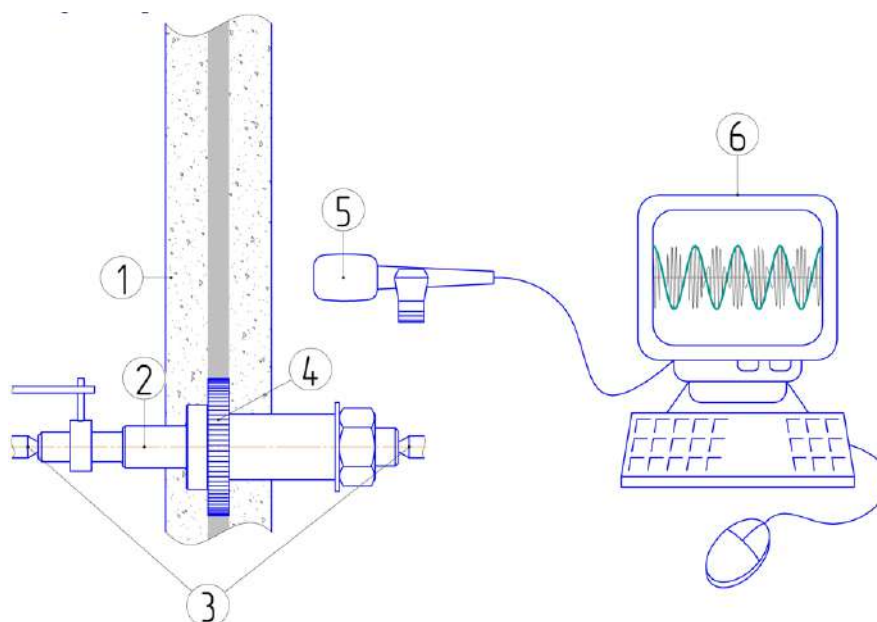


Рисунок 1 – Схема эксперимента

- 1 – шлифовальный круг; 2 – оправка в центрах 3; 4 – образец из стали 45;
5 – микрофон; 6 – персональный компьютер

С образцов, представляющих собой диски из стали 45, диаметром 70 мм, твердостью 50...55 HRCэ, до начала опыта удалялись следы предыдущей операции, а ШК перед каждым новым опытом подвергался правке.

Запись сигнала осуществлялась через компактный микрофон. В качестве инструмента для работы с полученными акустическими данными выбрана программа для персонального компьютера (ПК) – «SOUNDFORGE Pro 13.0», как наиболее приемлемая по функционалу, доступности и удобству в обращении. Задачей каждого отдельного опыта является фиксирование (запись) сигнала акустических вибраций при определенной комбинации факторов эксперимента.

Результаты и их обсуждение

Звуковые дорожки, записанные на цифровой носитель с определенной дискретностью, представляют собой объем данных, определяющих изменения амплитуды и частоты колебаний звуковой волны во времени. Поскольку шлифование образцов осуществлялось для различающихся технологических условий, ожидается наличие закономерных различий в характере каждого акустического сигнала.

Анализ частотного спектра. Холостой цикл

Осциллограмма, отражающая акустику холостой работы станка, представлена на рисунке 2, а). Учитываются звуки, порождаемые вибрациями технологической системы (ТС), исключая сам процесс удаления материала с поверхности заготовки: работа гидравлических насосов; высокоскоростное вращение шлифовальной бабки с шлифовальным кругом (50 м/с, 1590 об/мин); работа передней бабки, обеспечивающая вращение заготовки в центрах; работа механизма поперечной подачи; работа насоса подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), а также звук, с которым СОЖ омывает вращающийся ШК и удаляется в резервуар системы.

Также на рисунке 2, б) и в) представлены участки осциллограммы, охватывающие периоды времени 1 сек. и 0,1 сек. для более подробного изучения звуковой волны холостого цикла и проведения сравнения. Наблюдается отсутствие повторяющихся участков колебаний, случайный характер поведения амплитуды уровня звука во времени. Это вызвано тем, что большое количество источников создают звуковые волны, которые взаимодействуют между собой: интерферируют, резонируют и т. д. Результатом является акустическое явление, называемое шумом. Шум – беспорядочное неритмичное (непериодическое) смешение звуков различной интенсивности и частоты.

На рисунке 3 показана спектрограмма холостой работы станка.

Анализ частотного спектра. Рабочий цикл

Спектральный анализ и диаграммы, строящиеся на его основе, являются основным инструментом для изучения звука вообще и в данной работе в частности.

На начальном этапе изучения спектральной картины звука целесообразно провести сравнение спектрограмм для каждой подачи в определенные моменты времени от начала обработки, а также сопоставить их со спектрограммой холостой работы (см. рисунок 3).

Выбранные для сравнения моменты времени соответствуют началу, середине и окончанию цикла обработки: 1-я секунда, 150-я секунда и 300-я секунда. На рисунках 4 – 7 рассмотрены спектрограммы полного слышимого диапазона частот.

Из представленного материала видно, что на всех спектрограммах, включающих звук удаления припуска, заполнен «пробел» в высоких частотах (16 кГц – 20 кГц), присущий спектру холостой работы, кроме того уровень низких частот от 20 Гц до 100 Гц значительно выше, вследствие чего форма спектра рабочего цикла принципиально отличается от холмообразно-усеченной формы холостого цикла.

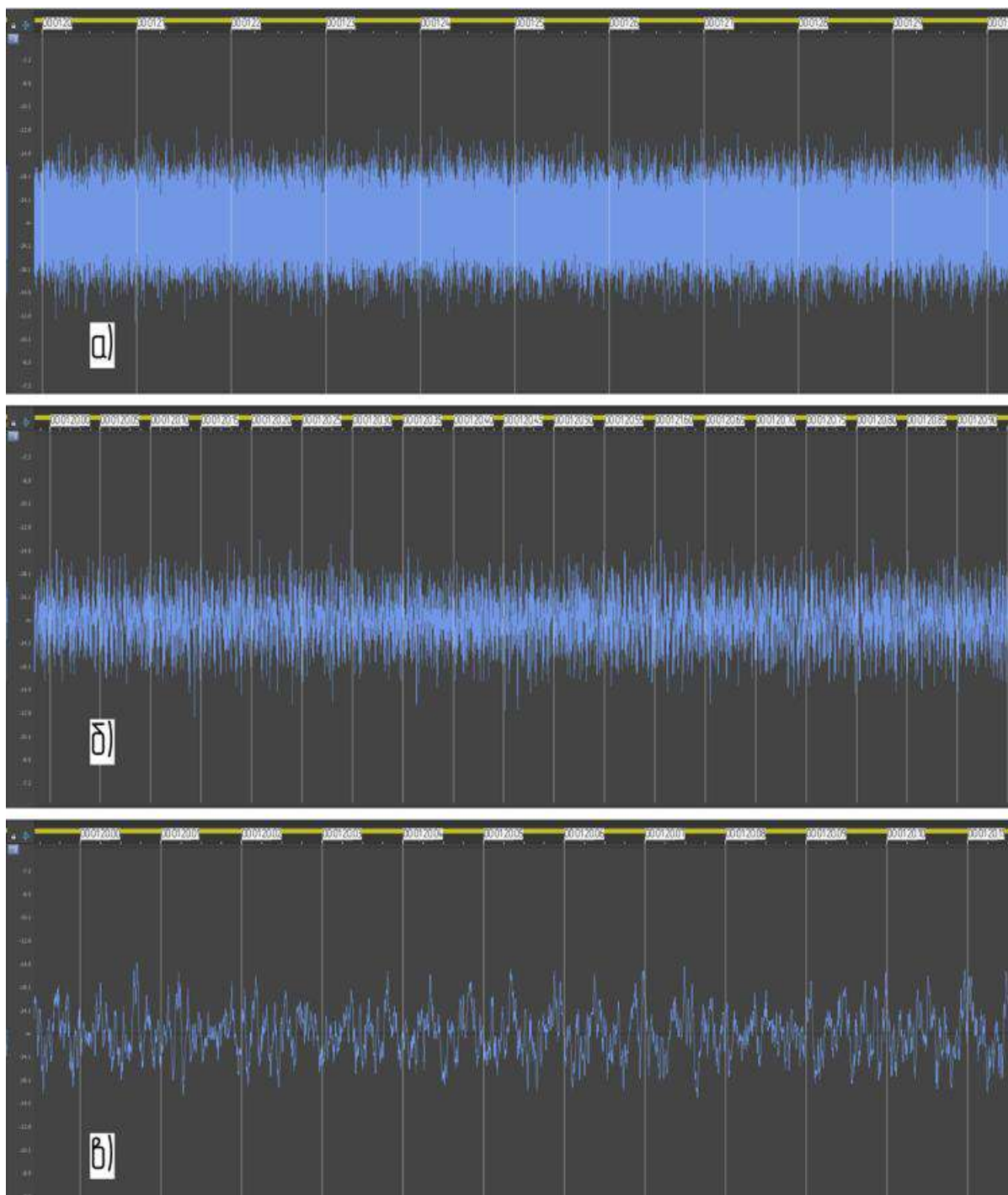


Рисунок 2 – Осциллограмма холостого работы станка 3М151 (без процесса резания) в масштабе: а) – 10 секунд; б) – 1 секунда; в) – 0,1 секунды

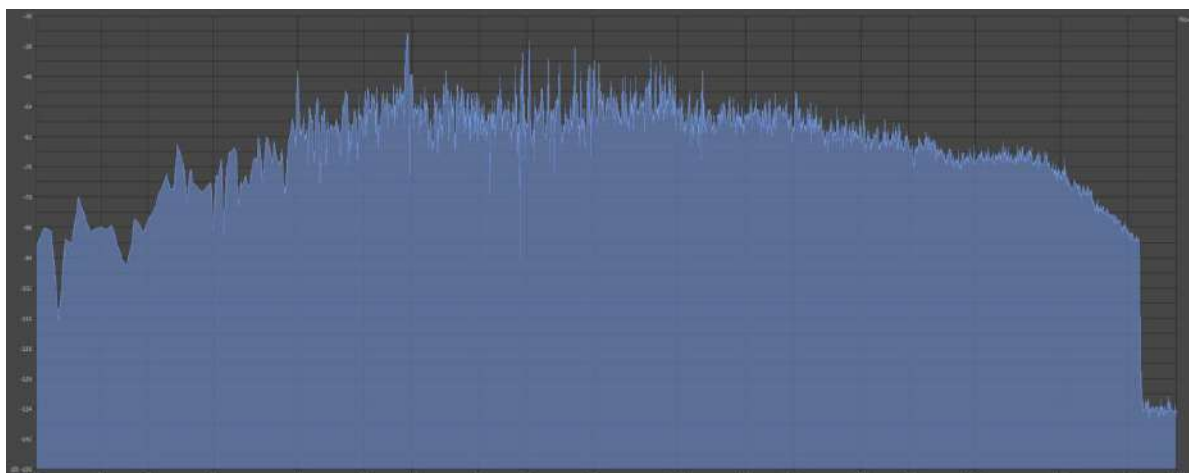


Рисунок 3 – Спектрограмма холостой работы в слышимом частотном диапазоне

На рисунках 4 – 7 разным цветом отмечены диапазоны частот, возникающие по ходу обработки и имеющие значительно более высокие значения уровня звука (дБ) по сравнению с прочими частотами. Важно заметить, что на начальном этапе обработки такие эксцессы отсутствуют полностью, либо имеют крайне слабо выраженный характер. В последующие моменты времени возникшие «пики» отчетливы и обладают сходными характеристиками при разных технологических условиях. Так, при рассмотрении первого эксцесса (на рисунках красным цветом) видно, что возникает он в диапазоне 700–800 Гц (центр такого диапазона находится на частоте 750 Гц) и по мере шлифования растет значение его амплитуды. Кроме того, имеют место прочие «пики» (2 – желтый, 3 – зеленый, 4 – синий, 5 – фиолетовый). Данные отклонения также имеют определенные диапазоны частот, неизменных для рассмотренных технологических условий. Центрами диапазонов 2, 3, 4 и 5 соответственно являются значения частот: 1500 Гц, 2300 Гц, 3000 Гц и 3800 Гц. Целесообразно заключить, что указанные частоты являются частотой основного тона и ее обертонами звуковых вибраций при шлифовании.

Отмечается, что частота основного тона согласуется с т.н. информативной частотой (700 Гц – 850 Гц), активно применяемой в работах [11–14], связанных с изучением акустических характеристик процесса шлифования. При более подробном рассмотрении информативного частотного диапазона заметно доминирование четырех четких гармоник, амплитуды которых отличаются стабильностью на протяжении всего опыта, их значения существенно превышают прочие. Такими частотами являются 709 Гц, 735 Гц, 762 Гц и 787 Гц (см. рисунок 8). При изучении экспериментальных данных также видно, что абсолютные максимумы значений амплитуд уровня звука в подавляющем большинстве проявляются именно на одной из указанных частот. Таким образом, частоты 709 Гц, 735 Гц, 762 Гц и 787 Гц представляют собой основной тон звука, порождаемого технологической системой при шлифовании. То есть, среди всего многообразия источников звука при шлифовании непосредственно с резанием связан звук, зарождающийся и развивающийся на указанных частотах.

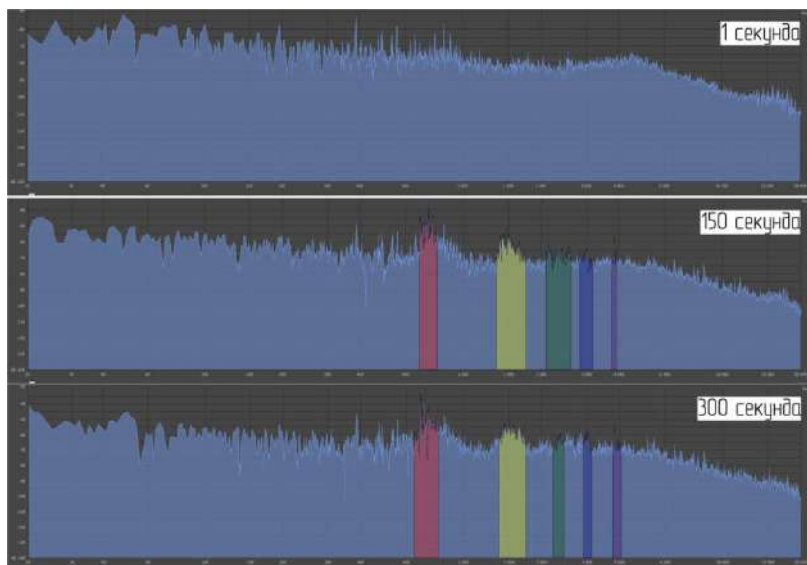


Рисунок 4 – Спектр звука, генерируемого при шлифовании с подачей 0,2 мм/мин в моменты времени: 1 секунда– 150 секунд– 300 секунд от начала обработки

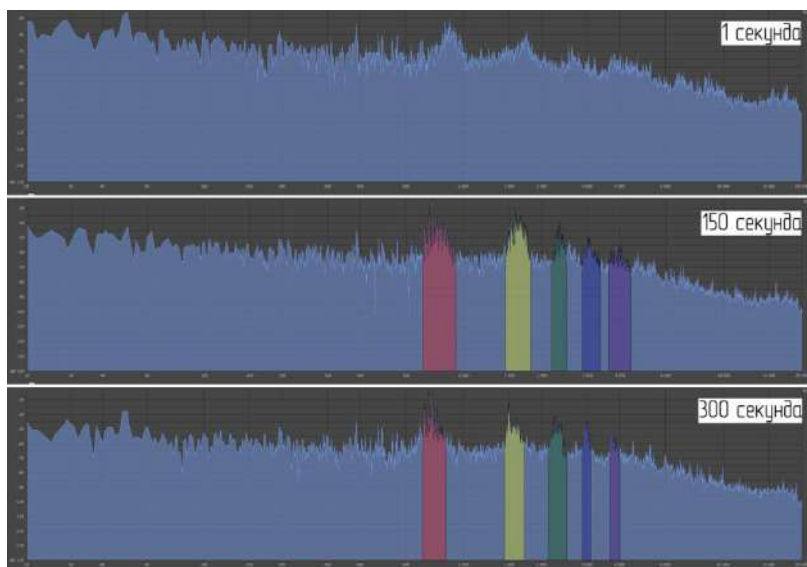


Рисунок 5 – Спектр звука, генерируемого при шлифовании с подачей 0,3 мм/мин в моменты времени: 1 секунда– 150 секунд– 300 секунд от начала обработки

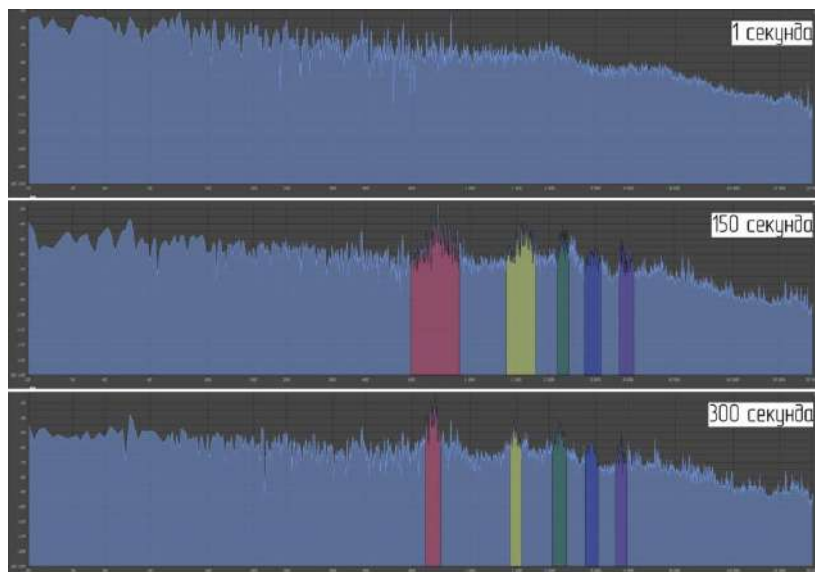


Рисунок 6 – Спектр звука, генерируемого при шлифовании с подачей 0,5 мм/мин в моменты времени: 1 секунда – 150 секунд– 300 секунд от начала обработки

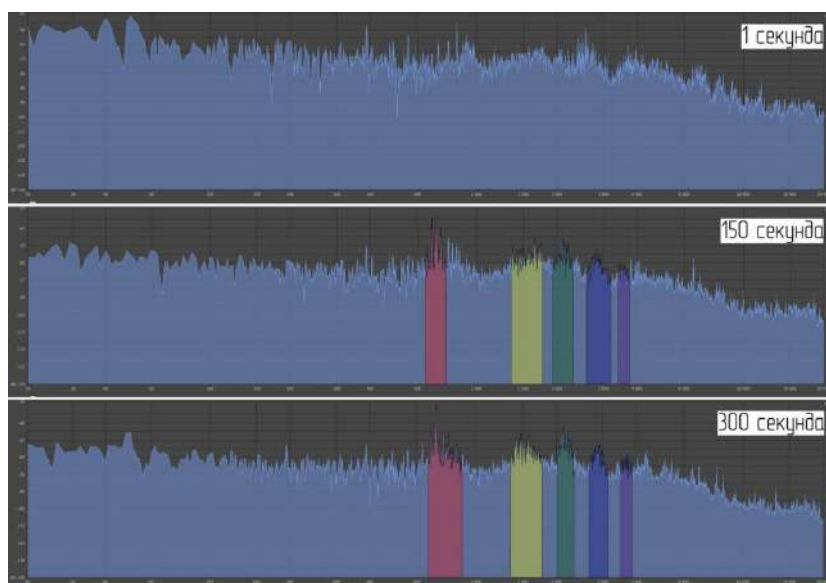


Рисунок 7 – Спектр звука, генерируемого при шлифовании с подачей 0,8 мм/мин в моменты времени: 1 секунда– 150 секунд– 300 секунд от начала обработки

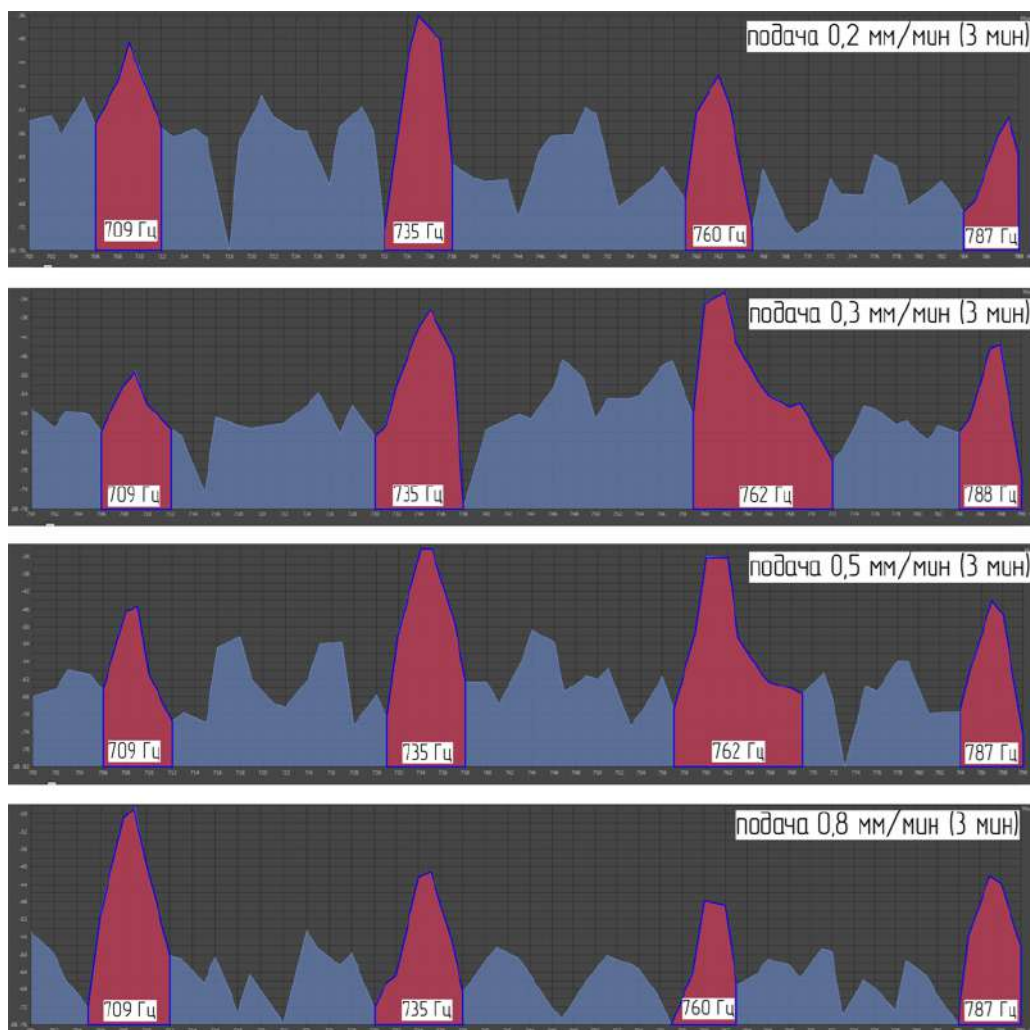


Рисунок 8 – Стабильные гармоники информативной частоты для различных режимов шлифования

В начальный момент времени, соответствующий первой секунде от начала удаления припуска с поверхности образца (см. рисунок 9, а)), на осциллограммах не наблюдается периодических колебаний. Характер кривых хаотичен, визуально не отличается от аналогичных осциллограмм холостой работы ТС (см. рисунок 3), изменение амплитуд и частот во времени беспорядочное и неритмичное.

При сравнении осциллограмм в начальный момент обработки на разных режимах резания отмечается увеличение амплитуд звуковых колебаний с ростом скорости врезной подачи. То есть, фактор скорости врезной подачи начинает оказывать серьезное влияние на звуковую характеристику уже на этапе приработки, при неустоявшемся режиме резания. Данное влияние продолжается на протяжении всего цикла обработки (см. рисунок 9, б)).

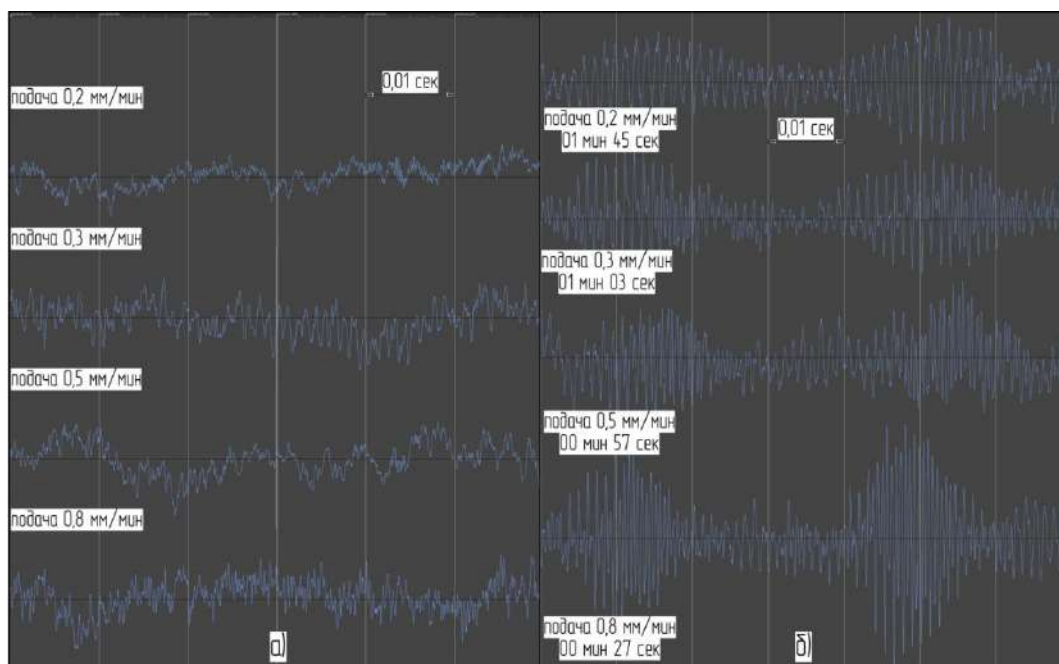


Рисунок 9 – Характерные участки осциллограмм:
а) – неустоявшегося и б) – устоявшегося режимов резания

Характерной особенностью осциллограмм устоявшегося режима резания, соответствующего нормальному этапу износа абразивного зерна, является качественное изменение поведения амплитудно-частотной характеристики во времени с беспорядочного на периодический (см. рисунок 9, б). Наблюдается чередование узлов и пучностей.

Необходимо отметить, что к представленному на рисунках 9, б) виду осциллограммы приходят не одновременно. Если при подаче 0,8 мм/мин периодические амплитудные модуляции наблюдаются уже через 25–27 секунд от начала резания, то для подачи 0,5 мм/мин – через 43–45 секунд, для подачи 0,3 мм/мин – через 65–68 секунд, для подачи 0,2 мм/мин – более чем через 90 секунд от начала обработки.

Другой важной особенностью осциллограмм устоявшегося режима резания является проявление т.н. несущего и модулированного сигналов. Частота несущего сигнала составляет от 700 Гц до 780 Гц в соответствии с измерениями периодов высокочастотных колебаний для каждого режима шлифования. Период таких колебаний составляет от 0,00143 сек до 0,00128 сек (см. рисунок 9, б)). Поскольку несущая частота отсутствует при неустановившемся режиме резания, целесообразно заключить, что ее появление свидетельствует о возникновении новых вибраций – автоколебаний, непосредственно связанных с процессом удаления припуска при шлифовании.

Установление качественной и, в последствии, количественной зависимости между амплитудой и частотой звуковой волны и технологическими условиями при шлифовании позволит применять простой и нересурсозатратный косвенный метод оценки работоспособности шлифовального круга. Точность такого метода, как и любого, косвенного метода, зависит от погрешностей при проведении эксперимента и обработке данных и может уступать точности некоторых из прямых методов оценки. Однако, ввиду высокой информативности и низкой трудоемкости акустический метод, использующий характеристики звуковой волны в качестве критерия оценки работоспособности ШК, является весьма перспективным.

Максимально возможное использование ресурса работоспособности ШК с соблюдением требований конструкторской документации позволит значительно сократить подготовительно-заключительное время операций шлифования, повысить общую эффективность производства. Возможность определять текущую режущую способность ШК по звуковому критерию позволит проводить рациональное проектирование операций шлифования, с учетом количества обрабатываемых поверхностей за период стойкости инструмента и времени, затрачиваемого на его правку.

Выводы

1 Осциллограммы звука, записанного в различных технологических условиях, показали, что рост уровня звука происходит на протяжении всего процесса шлифования непрерывно и неравномерно: имеют место участки затухания и резкого роста.

2 Выявлены три характерных этапа развития амплитудно-частотной характеристики во времени, согласующиеся с известными циклами износа абразивных зерен ШК.

3 Осциллограмма холостого цикла работы технологической системы имеет хаотичный характер и соответствует акустическому явлению, называемому шумом.

4 Выявлен основной тон вибраций (700 – 800 Гц) автоколебаний, создающий звуковые колебания процесса резания, а также его обертоны (1500 Гц, 2300 Гц, 3000 Гц и 3800 Гц)

5 Выявлены четыре стабильные гармоники, доминирующие в спектре информативных частот – 709 Гц, 735 Гц, 762 Гц и 787 Гц, представляющие собой основной тон звука, порождаемого технологической системой при удалении припуска.

6 Периодический характер звуковых колебаний присущ устоявшемуся процессу шлифования, тогда как неустоявшийся порождает непериодические колебания.

7 На амплитуду звуковых колебаний оказывает влияние как скорость врезной подачи, так и время от начала обработки, причем скорость врезной подачи влияет в большей мере.

8 Звуковой сигнал процесса шлифования состоит из несущей частоты (714–750 Гц) и модулированной частоты (25–30 Гц).

9 Рациональное, максимально возможное использование ресурса работоспособности шлифовального круга, может быть обеспечено применением косвенного метода оценки работоспособности инструмента, с использованием звуковой характеристики в качестве критерия.

Список литературы

1. Лурье, Г.Б. Шлифование металлов. М., Машиностроение, 1969. – 172 с.
2. Лурье, Г.Б. Вибрации при шлифовании // Станки и инструмент, вып. 6. М., 1959, № 1. – с. 15 – 17.
3. Лурье, Г. Б. Автоколебания при шлифовании // Абразивы, вып. 27. М., ЦБТИ, 1961. – с. 78-83.
4. Лурье, Г.Б. О некоторых закономерностях процесса круглого шлифования. Сб. Качество поверхности, вып. 3, М., Изд-во АН СССР, 1957. — С. 52–75.
5. Кудинов В.А. Динамика станков. М., Машиностроение, 1967. — 359 с.
6. Кудинов В.А., Тодоров Н.П. Закономерности развития колебаний и волнистости круга и изделия при врезном шлифовании // Станки и инструмент, 1970, № 2. — С. 1–3.
7. Методика испытания плоскошлифовальных станков общего назначения на виброустойчивость при резании и уровень колебания холостого хода. Руководящие технические материалы. Сост. В.А. Кудинов, Г.С. Вильнер. М., ОНТИ ЭНИМС, 1964. — 22 с.
8. Гельфельд О. Вынужденные колебания в круглошлифовальном станке, вызванные дисбалансом шлифовального круга. // Станки и инструмент, 1961, № 7. — С. 23–28.

9. Landberg. Versuche die Natur des Schleifvorganges betreffen. *Microtechnik*, 1957, №1. (Попытки обратиться к природе шлифовального процесса)
10. E. Salje. Forschungsergebnisse beim Aussenrundsleifen. *Werkstattstechnik und Maschinenbau*, 1953, №3. (Результаты исследований наружного круглого шлифования)
11. Гурьянихин, В.Ф. Влияние режимов шлифования на интенсивность акустического сигнала и показатели процесса круглого наружного врезного шлифования / В.Ф. Гурьянихин, Д.В. Аринин // *Вестник Ульяновского государственного технического университета*. – 2000. – № 4. – С. 79-83. – Библиогр.: 2 назв.
12. Аринин, Д. В. Исследование режущей способности шлифовальных кругов при круглом наружном врезном шлифовании с использованием информации по низкочастотному акустическому сигналу / Д.В. Аринин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2002. – Том 305, № 2. – С. 179-182. – Библиогр.: 2 назв.
13. Гурьянихин, В.Ф. Управление процессом круглого наружного врезного шлифования с использованием акустического сигнала / В.Ф. Гурьянихин, В.В. Агафонов, А.А. Панков // *СТИН*. – 2009. – № 2. – С. 35-40. – Библиогр.: 9 назв.
14. Агафонов, В. В. Повышение эффективности круглого наружного врезного шлифования путем управления скоростью подачи по интенсивности звукового сигнала / В.В. Агафонов // *Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. – Ульяновск: Типография УлГТУ, 2010. – 19 с.: ил.; Библиогр.: 10 назв.

ANALYSIS OF THE FREQUENCY SPECTRUM OF THE SOUND OF THE EXTERNAL CIRCULAR PLUNGE-CUT GRINDING

Ardashev D.V.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: ardashev dv@susu.ru
Zhukov A.S.¹, PHD studen (Engineering), e – mail: 89127773160@mail.ru

¹ South Ural State University, 76 Prospekt Lenina, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation

Abstract

To assess the current state of a technological system during grinding, it is preferable to use indirect criteria. This work studies the acoustic parameters of grinding as a sufficiently informative and least resource-intensive characteristic. The paper analyzes the experimental data on the study of the characteristics of the sound wave arising in the process of grinding. Its results are discussed. A brief description of the experimental study is given. Oscillograms of sound vibrations of the grinding process are considered, and the results of spectral analysis are presented. A qualitative comparison of the sound recorded during idle operation of the machine and when processing samples in different modes has been carried out. The spectral composition of the sound during grinding was investigated, the nature of the dependence on the speed of radial feed rate of the wheel and on the duration of processing was revealed. Based on the results of the work, conclusions are drawn.

Keywords: amplitude-frequency characteristic, acoustic analysis of sound, spectral analysis of sound, grinding process.

УДК 621.922

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЛЕПЕСТКОВЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*САПУНОВ Валерий Викторович¹, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: sapunov_vv@mail.ru*
*ЕВСТИГНЕЕВ Алексей Дмитриевич¹, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: alekseievst@mail.ru*
*ЧИСТЯКОВ Владимир Сергеевич¹, студент,
e-mail: v_s_chistyakov@mail.ru*

¹Ульяновский государственный технический университет, 432027,
Российская Федерация, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований силовой напряженности шлифования и работоспособности лепестковых шлифовальных кругов различных производителей при обработке заготовок из алюминиевого сплава. Рассмотрена возможность использования данных кругов при обработке на робототехническом комплексе.

Ключевые слова: лепестковый шлифовальный круг, робототехнический комплекс, коэффициент шлифования, шероховатость, сила резания, параметры режимов резания.

Введение

В настоящее время автомобилестроительные и авиастроительные предприятия активно внедряют в производство высокоэффективные робототехнические комплексы в том числе для механической обработки (фрезерования) заготовок. При этом остается ряд операций, где робототехнические комплексы в силу ряда обстоятельств практически не используются, например финишная обработка поверхности зачистными кругами. Замена ручного труда на автоматизированный позволила бы существенно повысить производительность обработки и качество изделий [1,2]. Так, например, на авиастроительных предприятиях России трудоемкость финишной обработки деталей, образующих несущую конструкцию летательного аппарата, может достигать 70 % от общей трудоемкости изготовления детали [3-5]. К основным причинам, препятствующим внедрению робототехнических комплексов, можно отнести повышенные вибрации при обработке из-за недостаточной жесткости робота, сложность траектории движения робота для обеспечения обработки в труднодоступных местах деталей, сложность оценки износа абразивного инструмента для его своевременной замены или корректировки программы и как следствие недостаточное качество обработанной поверхности. Данные проблемы частично можно решить путем подбора оптимального абразивного инструмента (АИ) и разработки рекомендаций по назначению режимов обработки. С этой целью были проведены экспериментальные исследования работоспособности лепестковых шлифовальных кругов при обработке заготовок из алюминиевых сплавов. Для нивелирования влияния жесткости роботизированного комплекса, на первом этапе исследования проводились на плоскошлифовальном станке с высокой жесткостью технологической системы [6-8].

Методика исследований

Исследования выполняли на экспериментальной установке, основой которой послужил плоскошлифовальный станок 3Д710В-2. Использовали лепестковые шлифовальные круги (ЛШК) двух производителей: ОАО «Белгородский абразивный завод» (ОАО «БАЗ») и ОАО «Волжский абразивный завод» (ОАО «ВАЗ») (табл. 1).

Таблица 1 – Номенклатура АИ, применяемого при исследовании

№ п/п	Обозначение производителя	Зернистость	Производитель	Абразивный материал
1	КШЛ 150 x 30 x 32 мм K100 KK19XW 12H	P100	ОАО «БАЗ»	Электрокорунд нормальный
2	КШЛ 150 x 30 x 32 мм K60 KK19XW 25H	P60	ОАО «БАЗ»	
3	КШЛ 150 x 30 x 32 мм K40 KK19XW 40H	P40	ОАО «БАЗ»	
4	КЛ 150 x 30 x 32 XF569 P100	P100	ОАО «ВАЗ»	
5	КЛ 150 x 30 x 32 XF569 P60	P60	ОАО «ВАЗ»	
6	КЛ 150 x 30 x 32 XF569 P40	P40	ОАО «ВАЗ»	

При оценке работоспособности кругов шлифовали призматические заготовки из алюминиевого сплава Д16Т с рабочей скоростью $V_k = 26$ м/с (по периферии круга). Заготовки изготавливали из одной партии материалов, рассеивание микротвердости которых не превышало $\pm 3,5$ %. Перед началом каждой серии опытов партию заготовок вышлифовывали в один размер с допуском по 7 качеству и шероховатостью $Ra \leq 1,6$ мкм. В процессе исследований контролировали силы шлифования P_z, P_y , объем материала W_m , снятого с заготовки, объемный износ круга W_a , коэффициент шлифования $K_{ш}$ (по ГОСТ 2424) и высотные параметры шероховатости обработанной поверхности $Ra, Rz, Rmax$. Силы шлифования измеряли с помощью измерительного комплекса, включающего динамометр УДМ – 100, усилитель и персональный компьютер, выполняющий функцию регистрирующего устройства. Измерительный комплекс позволяет проводить настройку сценариев эксперимента, осуществлять хранение и поиск нужного сценария в базе данных, проводить сквозную калибровку измерительных каналов, измерения в реальном масштабе времени с одновременной архивацией и визуализацией экспериментальных данных, просматривать и анализировать результаты.

Объем материала, снятого с заготовки и объемный износ круга контролировали путем взвешивания заготовки и круга до и после обработки с использованием весов ВЛТ-500. Высотные параметры шероховатости обработанной поверхности измеряли на профилемере модели 130.

Варьируемые факторы – скорость продольного перемещения стола (скорость продольной подачи) V_{cm} , м/мин, поперечную подачу S_n , мм/ход, и натяг (врезную подачу) N , мм, – устанавливали, исходя из постановки полного факторного эксперимента (табл. 2). Обработку результатов полного факторного эксперимента выполняли по РДМУ 109-77[9] с помощью компьютера. Число параллельных опытов, рассчитанное по результатам предварительного эксперимента, равно 3.

Таблица 2 – Значения варьируемых факторов

Условия планирования	Факторы		
	S_n , мм/ход	N , мм	V_{cm} , м/мин
	X_1	X_2	X_3
Верхний уровень	8	1	3
Основной уровень	6	0,7	2,1
Нижний уровень	4	0,4	1,2

Результаты

По результатам многофакторного исследования работоспособности ЛШК различных производителей получили зависимости, приведенные в табл. 3–5. На первом этапе исследовали силовую напряженность плоского шлифования периферией кругов, изготовленных на ОАО «БАЗ». Фиксировали радиальную P_y и касательную P_z составляющие силы шлифования, а также потерю массы ЛШК и заготовки, а затем определяли коэффициент шлифования $K_{ш}$ и измеряли шероховатость обработанной поверхности. На основании уравнений регрессии построили зависимости сил P_y и P_z , коэффициента шлифования $K_{ш}$, параметра шероховатости Ra от натяга N , и скорости стола V_{cm} при поперечной подаче $S_n = 4$ мм/ход. В качестве примеров некоторые из указанных зависимостей показаны на рис. 1 – 2.

Таблица 3 – Регрессионные зависимости критериев P_y , P_z , $K_{ш}$, Ra от натяга N , поперечной подачи S_n и скорости стола V_{cm} при шлифовании кругами с зернистостью P100

Производитель	Критерий	Уравнения регрессии	№ зависимости
ОАО «БАЗ»	Сила P_z	$P_z = -23,19 + 4,71S_n + 34,63N + 3,21V_{cm} - 3,66S_nN - 0,52S_nV_{cm} - 5,25NV_{cm} + 1,31S_nNV_{cm}$	(1)
	Сила P_y	$P_y = -10,51 + 2,14S_n + 15,79N + 1,51V_{cm} - 1,69S_nN - 0,25S_nV_{cm} - 2,53NV_{cm} + 0,63S_nNV_{cm}$	(2)
	Коэффициент шлифования $K_{ш}$	$K_{ш} = -68,1 + 11,51S_n + 119,06N + 35,52V_{cm} - 22,68S_nN - 4,17S_nV_{cm} - 55,48NV_{cm} + 8,18S_nNV_{cm}$	(3)
	Среднее арифметическое отклонение профиля Ra	$Ra = 4,01 - 0,15S_n - 3,61N - 0,57V_{cm} + 1,45S_nN + 0,02S_nV_{cm} + 1,16NV_{cm} + 0,10S_nNV_{cm}$	(4)
ОАО «БАЗ»	Сила P_z	$P_z = -8,89 + 1,80S_n + 13,26N + 1,30V_{cm} - 1,42S_nN - 0,21S_nV_{cm} - 2,13NV_{cm} + 0,53S_nNV_{cm}$	(5)
	Сила P_y	$P_y = -23,19 + 4,71S_n + 34,63N + 3,21V_{cm} - 3,66S_nN - 0,52S_nV_{cm} - 5,25NV_{cm} + 1,31S_nNV_{cm}$	(6)
	Коэффициент шлифования $K_{ш}$	$K_{ш} = 16,99 - 2,38S_n - 8,92N - 8,92V_{cm} + 1,38S_nN + 1,61S_nV_{cm} + 7,03NV_{cm} - 1,36S_nNV_{cm}$	(7)
	Среднее арифметическое отклонение профиля Ra	$Ra = 11,69 - 1,43S_n - 7,45S_{sp} - 3,16V_{cm} + 1,52S_nS_{sp} + 0,46S_{sp}V_{cm} + 2,41S_{sp}V_{cm} - 0,42S_nS_{sp}V_{cm}$	(8)

Таблица 4 – Регрессионные зависимости критериев P_y , P_z , $K_{ш}$, Ra от натяга N , поперечной подачи S_n и скорости стола V_{cm} при шлифовании кругами с зернистостью Р60

Производитель	Критерий	Уравнения регрессии	№ зависимости
ОАО «БАЗ»	Сила P_z	$P_z = 13,30 - 1,88S_n + 7,59N - 7,10V_{cm} + 2,82S_nN + 1,27S_nV_{cm} + 5,80NV_{cm} - 1,08S_nNV_{cm}$	(9)
	Сила P_y	$P_y = 8,61 - 1,24S_n + 4,19N - 3,55V_{cm} + 1,93S_nN + 0,82S_nV_{cm} + 7,01NV_{cm} - 0,73S_nNV_{cm}$	(10)
	Коэффициент шлифования $K_{ш}$	$K_{ш} = 26,67 + 1,40S_n - 21,87N - 9,27V_{cm} - 2,10S_nN - 0,30S_nV_{cm} + 9,92NV_{cm} + 0,35S_nNV_{cm}$	(11)
	Среднее арифметическое отклонение профиля Ra	$Ra = 2,30 + 1,19S_n + 15,33N + 1,52V_{cm} - 2,36S_nN - 0,30S_nV_{cm} - 4,54NV_{cm} + 0,75S_nNV_{cm}$	(12)
ОАО «ВАЗ»	Сила P_z	$P_z = 5,14 - 0,74S_n + 2,46N - 2,72V_{cm} + 1,16S_nN + 0,49S_nV_{cm} + 4,20NV_{cm} - 0,44S_nNV_{cm}$	(13)
	Сила P_y	$P_y = 13,30 - 1,88S_n + 7,59N - 7,10V_{cm} + 2,82S_nN + 1,27S_nV_{cm} + 5,80NV_{cm} - 1,08S_nNV_{cm}$	(14)
	Коэффициент шлифования $K_{ш}$	$K_{ш} = -0,86 + 1,10S_n + 3,12N + 4,46V_{cm} - 1,35S_nN - 0,83S_nV_{cm} - 3,86NV_{cm} + 0,74S_nNV_{cm}$	(15)
	Среднее арифметическое отклонение профиля Ra	$Ra = 9,59 - 1,09S_n - 6,25S_{ep} - 1,30V_{cm} + 1,52S_nS_{ep} + 0,22S_{ep}V_{cm} + 1,42S_{ep}V_{cm} - 0,23S_nS_{ep}V_{cm}$	(16)

Таблица 5 – Регрессионные зависимости критериев P_y , P_z , $K_{ш}$, Ra от натяга N , поперечной подачи S_n и скорости стола V_{cm} при шлифовании кругами с зернистостью Р40

Производитель	Критерий	Уравнения регрессии	№ зависимости
ОАО «БАЗ»	Сила P_z	$P_z = 14,04 + 0,71S_n + 2,41N - 3,64V_{cm} + 1,76S_nN + 0,31S_nV_{cm} + 4,94NV_{cm} - 0,08S_nNV_{cm}$	(17)
	Сила P_y	$P_y = 9,01 + 0,49S_n + 1,84N - 2,27V_{cm} + 1,08S_nN + 0,18S_nV_{cm} + 2,98NV_{cm}$	(18)
	Коэффициент шлифования $K_{ш}$	$K_{ш} = -3,97 + 9,19S_n + 21,32N + 0,70V_{cm} - 11,38S_nN - 2,87S_nV_{cm} - 4,05NV_{cm} + 3,39S_nNV_{cm}$	(19)
	Среднее арифметическое отклонение профиля Ra	$Ra = -2,73 + 0,23S_n - 1,25N + 2,04V_{cm} + 3,53S_nN - 1,31S_nV_{cm} - 0,61NV_{cm} + 0,3S_nNV_{cm}$	(20)
ОАО «ВАЗ»	Сила P_z	$P_z = 5,19 + 0,28S_n + 1,10N - 1,30V_{cm} + 0,62S_nN + 0,10S_nV_{cm} + 1,69NV_{cm} + 0,01S_nNV_{cm}$	(21)
	Сила P_y	$P_y = 14,04 + 0,71S_n + 2,41N - 3,64V_{cm} + 1,76S_nN + 0,31S_nV_{cm} + 4,94NV_{cm} - 0,08S_nNV_{cm}$	(22)
	Коэффициент шлифования $K_{ш}$	$K_{ш} = 25,51 - 3,38S_n - 19,46N - 10,15V_{cm} + 2,86S_nN + 1,31S_nV_{cm} + 9,89NV_{cm} - 1,09S_nNV_{cm}$	(23)
	Среднее арифметическое отклонение профиля Ra	$Ra = 1,57 + 0,55S_n + 8,24S_{ep} + 0,24V_{cm} - 0,88S_nS_{ep} - 0,03S_{ep}V_{cm} - 0,99S_{ep}V_{cm} + 0,08S_nS_{ep}V_{cm}$	(24)

Исходя из результатов проведенных исследований можно сделать вывод о том, что коэффициент шлифования и шероховатость обработанной поверхности прямо пропорционально зависят от зернистости ЛШК.

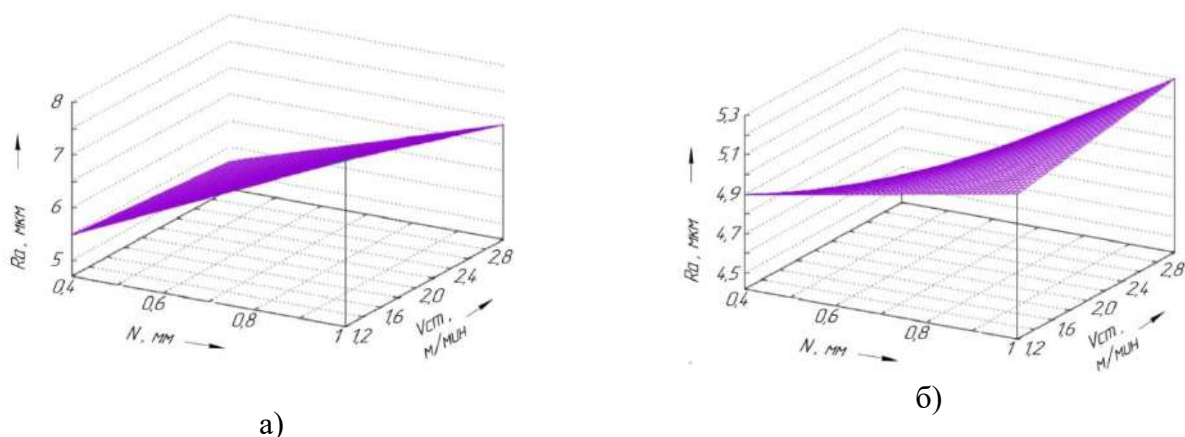


Рисунок 1 – Зависимость среднего арифметического отклонения профиля Ra от натяга N и скорости стола V_{cm} : поперечная подача $S_n=4$ мм/ход; $V_k=26$ м/с, зернистость круга Р60:
а – ЛШК производства ОАО «БАЗ»; б – ЛШК производства ОАО «ВАЗ»

Выявлено, что при увеличении натяга коэффициент шлифования снижается, при этом более явно данная закономерность прослеживается при обработке ЛШК с большой зернистостью. Отмечено, что коэффициент шлифования при обработке ЛШК производства ОАО «ВАЗ» несколько ниже, чем при шлифовании ЛШК, изготовленными на ОАО «БАЗ», при этом более низкую шероховатость удалось получить при обработке заготовок кругами ОАО «ВАЗ». Скорость продольной подачи стола при максимальных значениях натяга оказывает несущественное влияние на коэффициент шлифования, при этом, при минимальных значениях натяга, увеличение скорости стола, в зависимости от зернистости применяемого ЛШК, приводит либо к увеличению, либо к уменьшению коэффициента шлифования. С ростом натяга среднее арифметическое отклонение профиля поверхности Ra возрастает в значительной мере, это связано с увеличением амплитуды вибраций, возникающих при шлифовании. Возрастающее продольное подачу стола приводит к незначительному росту высотных параметров шероховатости. Наибольшее влияние на величину коэффициента шлифования и шероховатость обработанной поверхности оказывает натяг.

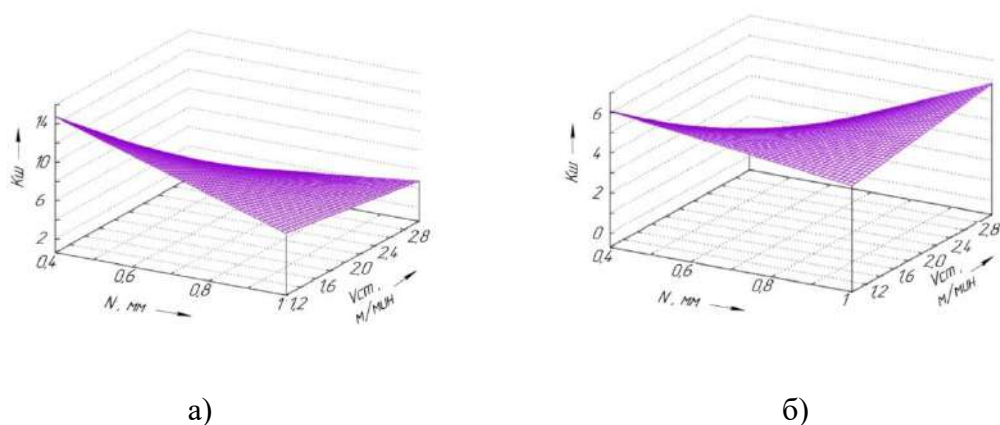


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента шлифования K_{sh} от натяга N и скорости стола V_{cm} : поперечная подача $S_n=4$ мм/ход; $V_k=26$ м/с, зернистость круга Р40:
а – ЛШК производства ОАО «БАЗ»; б – ЛШК производства ОАО «ВАЗ»

В ходе экспериментальных исследований выявлено, что радиальная P_y и касательная P_z составляющие силы шлифования прямо пропорционально зависят от зернистости ЛШК. Увеличение натяга и продольной подачи стола также приводит к увеличению составляющих силы шлифования, при этом преобладающее влияние оказывает именно создаваемый натяг между ЛШК и заготовкой. Отмечено, что место производства ЛШК практически не влияет на касательную составляющую силы шлифования P_z , при этом радиальная составляющая силы шлифования P_y существенно выше при обработке ЛШК производства ОАО «ВАЗ».

Выводы

В результате проведения экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- получены математические модели, описывающие зависимость экспериментальных значений сил P_y , P_z , параметра шероховатости Ra и коэффициента шлифования $K_{ш}$ от элементов режима шлифования;

- выявлено, что преобладающее влияние на значения сил P_y , P_z , параметр шероховатости Ra и коэффициент шлифования $K_{ш}$ оказывает натяг, создаваемый между ЛШК и заготовкой, таким образом при обработке на робототехническом комплексе для снижения создаваемых вибраций особое внимание следует уделить максимально допустимому значению создаваемого натяга;

- отмечено, что более высокие силы шлифования возникают при обработке кругами производства ОАО «ВАЗ», таким образом при обработке на робототехническом комплексе для снижения создаваемых вибраций более предпочтительным будет использование кругов производства ОАО «БАЗ»;

- отмечено, что более низкая шероховатость обработанной поверхности при прочих равных условиях достигается при обработке кругами производства ОАО «ВАЗ».

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 19-48-730002 p_a.

Список литературы

1. Подашев Д.Б. Развитие научных основ технологии финишной обработки деталей из алюминиевых и титановых сплавов полимерно-абразивными инструментами // Диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук. Иркутск. 2019. 443 с.
2. Sapunov V.V. Simulation of the temperature distribution in semi-finished products of combined abrasive tools during their microwave heating / V.V. Sapunov, N.I. Vetkasov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020, ICMTME 2019. – С. 044055.
3. Подашев Д.Б. Исследование качества кромки детали, обработанной промышленным роботом // Технология машиностроения. 2020. № 9. С. 59-66.
4. Димов Ю.В. Шероховатость поверхности при обработке полимерно-абразивными кругами / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2 (133). С. 10-26.
5. N. Vetkasov, S. Ulitin, O. Krupennikov, V. Sapunov, A. Ankilov, Simulation of thermal strength of the process of flat grinding of workpieces in intermittent circles, MATEC Web of Conferences, 298, 00022 (2019).
6. Сапунов В.В. Совершенствование технологии изготовления абразивного инструмента на бакелитовой связке с применением микроволнового излучения / автореферат дис. ... кандидата технических наук / Ульян. гос. техн. ун-т. Ульяновск, 2015. – 22 с.

7. V. Sapunov, N. Vetkasov, L. Khudobin, The study of the health of grinding wheels on a bakelite bunch, heat-treated in a microwave field, *Materials Today: Proceedings*, v. 38(4), pp. 1711-1713 (2021).

8. Димов Ю.В. Силы резания при обработке плоскостей торцевыми полимерно-абразивными щетками / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. Т. 22. № 5 (136). С. 28-45.

9. Методические указания. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов. РДМУ 109-77. – М.: Изд-востандартов, 1978. – 64 с.

RESEARCH OF OPERABILITY OF PETAL GRINDING WHEELS WHEN PROCESSING BLANKS FROM ALUMINUM ALLOYS

Sapunov V. V., Ph.D. (Engineering), docent, e – mail: sapunov_vv@mail.ru

Evstigneev A.D., Ph.D. (Engineering), docent, e – mail: alekseievst@mail.ru

Chistyakov V.S., student, e – mail: v_s_chistyakov@mail.ru

Ulyanovsk State Technical University, 432027, Russian Federation, Ulyanovsk, st. Northern Crown, 32

Abstract

The results of experimental studies of the force intensity of grinding and the performance of flap grinding wheels of various manufacturers in the processing of billets from an aluminum alloy are presented. The possibility of using these circles when processing a robotic complex is considered.

Keywords: flap grinding wheel, robotic complex, grinding ratio, roughness, cutting force, parameters of cutting conditions.

УДК 621.91.01

КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ ПРИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*БАЗРОВ Борис Мухтарбекович.¹, доктор техн. наук, профессор
ХЕЙФЕЦ Михаил Львович.², доктор техн. наук, профессор,
e-mail: mlk-z@mail.ru*

*ГУРЕВИЧ Валерий Львович.³, канд. техн. наук, доцент
СОЛОМАХО В.Л.⁴, доктор техн. наук, профессор*

ПОПОК Николай Николаевич.⁵, доктор техн. наук, профессор

¹ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, г. Москва, РФ,

²ГНУ Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, РБ,

³РУП Белорусский государственный институт метрологии, г. Минск, РБ

⁴Белорусский национальный технический университет, г. Минск, РБ

⁵УО Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк, РБ

Аннотация

С системных позиций изучены основные методы классификации и кодирования в машиностроении, рассмотрены их основные характеристики. При анализе системологии классификаций машин различного функционального назначения, показано отсутствие единого методического подхода в построении классификации и при кодировании изделий. В существующих классификациях, изделия рассматриваются конструктивно, только как объекты эксплуатации, а остальные этапы их жизненного цикла не затрагиваются. В результате системного анализа предлагается единый методический подход для построения классификаций, кодирования и унификации изделий различного функционального назначения, отражающий особенности всех этапов их жизненного цикла.

Для производственных этапов жизненного цикла рассмотрена система классификаций использующих различные способы кодирования: описание конструктивно-технологических элементов, формируемых кромками инструментов, последовательностью цифр с учетом знаков; описание поверхностей, формируемых движением инструмента, цифрами с указанием направлений движений подачи; а для описания сложнопрофильных поверхностей и сочетания элементов большой протяженности применяется их комбинация. Целесообразность использования каждой из классификаций в условиях реального производства определяется, по статистике применения конструктивно-технологических элементов и поверхностей, а также инструментов их формирующих.

Ключевые слова: системология, методический подход, жизненный цикл изделия, унификация, классификация, кодирование, модульная технология, конструктивно-технологический элемент.

Введение

Системология играет важную роль в отраслях машиностроения, способствует определению перспектив развития изделий, технологий их изготовления, определения задач и путей их решения в научных исследованиях и т.д. [1 - 3].

Особую актуальность для отраслей машиностроения в условиях цифровизированного производства приобретает системология в части классификации и кодирования, последующих стандартизации и унификации объектов и процессов производства [4 -6].

Решать эти задачи надо начинать с построения единой классификации изделий, а чтобы охватить классификацией все изделия, следует разработать системологию - многоступенчатую систему связанных классификаций [7 - 9].

В этой связи, *целью работы* является формирование с единых системных позиций научно-методического подхода к классификации и кодированию, стандартизации и унификации объектов и процессов при цифровизации всей последовательности этапов жизненного цикла изделий машиностроения [9 - 11].

Системный анализ классификаций на этапах жизненного цикла изделий

При системном анализе состояния классификаций в отраслях машиностроения и уровня охвата ими изделий видно, что широкое применение нашли два метода классификации объектов и процессов: иерархический и фасетный [2, 3, 5, 9].

Основными преимуществами *иерархического метода* является большая информационная емкость, традиционность и привычность применения, возможность создания для объектов и процессов классификации мнемонических кодов, несущих смысловую нагрузку.

При применении иерархического метода важную роль играет глубина классификации, она отражает число уровней классификатора. Чем больше глубина классификации, тем больше информации о множестве объектов и процессов, и тем эффективнее применение классификации.

Значительным недостатком иерархического метода является слабая гибкость структуры, обусловленная фиксированным основанием деления и заранее установленным порядком следования признаков, не допускающим включение новых классификационных группировок объектов и процессов. Поэтому, при изменении состава объектов классификации и процессов, их характеристик с помощью системы классификационных задач, требуется коренная переработка всего классификатора.

Основным преимуществом *фасетного метода* является гибкость структуры её построения. Изменения в любом из фасетов не оказывают существенного влияния на все остальные. Большая гибкость обуславливает хорошую приспособляемость классификации к меняющемуся характеру решаемых задач, для которых она создается. При фасетной классификации появляется возможность агрегации объектов и процессов, и осуществления информационного поиска по любому сочетанию фасетов.

Недостатками фасетного метода классификации являются неполное использование его большой емкости, нетрадиционность подхода и иногда значительная сложность применения.

Надо отметить, что одно и то же множество объектов и процессов, в зависимости от поставленной задачи, может быть представлено разными классификациями.

Изделие на протяжении своего жизненного цикла проходит производственные этапы: изготовления и эксплуатации, обслуживания и утилизации. Каждый из этапов, с позиций системологии, требует своей классификации, поскольку на этих этапах решаются разные задачи.

Применительно к этапу *эксплуатации* изделие создается под осуществление соответствующего процесса эксплуатации и условий его протекания. Поэтому в системологии классификация изделий должна содержать в качестве отличительных признаков характеристики изделия, непосредственно связанные с процессом эксплуатации и его условиями. С помощью такой классификации потребитель выбирает соответствующее изделие.

Например, машины для транспортировки груза должны делиться в соответствии с условиями, в которых осуществляется процесс транспортировки (наземный, воздушный, водный) и характеристиками процесса транспортировки (дальность, скорость) и др.

На этапах *изготовления и обслуживания* изделия классификация используется для выбора методов изготовления и ремонта изделия, технологического оборудования и средств оснащения и т.п. В этих случаях нужна классификация изделия, где в качестве отличительных признаков должны выступать характеристики конструкции изделия непосредственно связанные с технологией его изготовления и обслуживания, такие, как габаритные размеры, структура конструкции, качественные характеристики и др.

На этапе *утилизации* изделий нужна классификация, где в качестве отличительных признаков должны выступать характеристики конструкции изделия, непосредственно связанные с технологией утилизации.

Анализ изделий как объектов эксплуатации

Рассмотрим состояние системологии изделий, как объектов эксплуатации на примере классификации машин. Проведем анализ, как общей классификации машин, так и классификации группы машин различного назначения.

В процессе анализа устанавливались, лежащие в основе системологии:

- 1) метод классификации,
- 2) глубина классификации
- 3) структура классификации.

В трудах И.И. Артоболевского [12] приведена общая системология машин на основе иерархического метода классификации (рис. 1, *a*), которая содержит два уровня, на которых машины делятся по функциональному признаку: энергетические (двигатели, генераторы); рабочие (транспортные, технологические); информационные (контрольно-управляющие, математические); кибернетические.

Проанализируем системологию классификаций разнообразных групп машин различного назначения (табл. 1): легковые автомобили; грузоподъемные; подъемно-транспортные машины; трикотажные машины; холодильные машины; подметально-уборочные; машины для уплотнения и стабилизации балласта; машины мойки тары; компрессорные; подвижный состав; насосы; машины для приготовления цементобетонных смесей; электрические машины; гидравлические машины; краны.

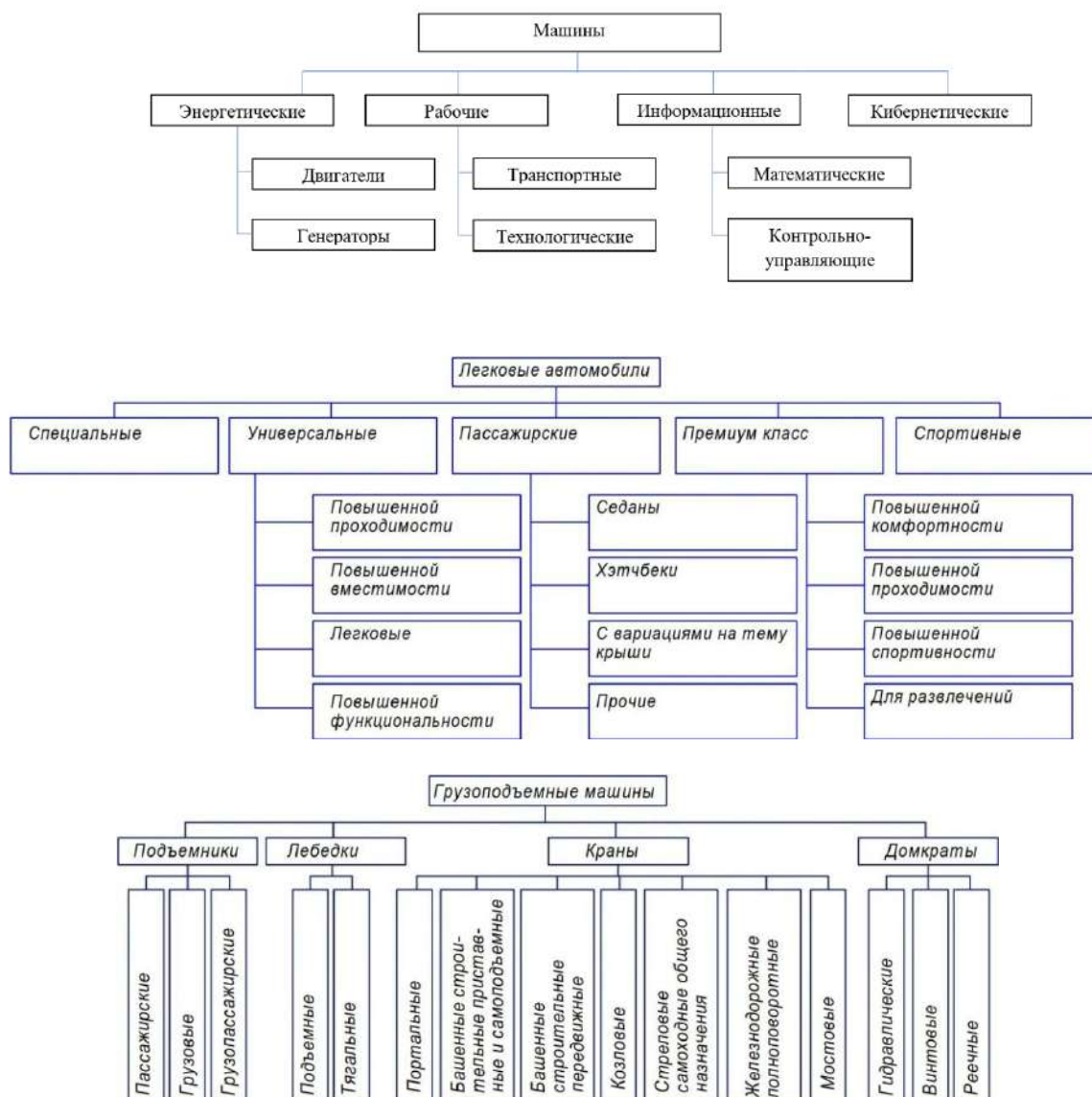


Рисунок 1 – Общая системология машин по И.И. Артоболевскому (а) и классификации легковых автомобилей (б) и грузоподъемных машин (в)

Таблица 1 – Системология и методы многоуровневой классификации машин

№	Наименование машины	Метод классификации	Количество уровней
1	Легковые автомобили	смешанный	2
2	Грузоподъемные	смешанный	2
3	Подъемно-транспортные	фасетный	1
4	Трикотажные	иерархический	4
5	Холодильные	иерархический	2
6	Подметально-уборочные	иерархический	4
7	Машины для уплотнения и стабилизации балласта	смешанный	3
8	Машины мойки тары	смешанный	4
9	Компрессорные	иерархический	4
10	Подвижный состав	смешанный	4
11	Насосы	смешанный	3
12	Машины для приготовления цементобетонных смесей	смешанный	2
13	Электрические машины	смешанный	3
14	Гидравлические машины	иерархический	3
15	Краны	смешанный	4

В процессе анализа классификаций (табл. 1) перечисленных машин (рис. 1, б, в и др.), также определялись метод классификации, число уровней в классификации, и ее структура в виде графов (рис. 2, а, б, в и др.).



Рисунок 2 – Графы классификаций машин: легковых автомобилей (а), грузоподъемных (б) и подъемно-транспортных машин (в)

По результатам системного анализа классификаций машин можно отметить следующее.

В некоторых классификациях применяются оба метода – иерархический и фасетный, когда машины делятся на уровни применяется иерархический метод, а на одном уровне машины делятся по разным признакам, как при фасетном методе.

Например, на рис. 1, б показана классификация легковых автомобилей, где наблюдается смешение иерархического и фасетного методов классификации. Так, на первом уровне расположены автомобили специальные, универсальные и одновременно пассажирские, спортивные и премиум класса. На втором уровне универсальные автомобили делятся на автомобили повышенной проходимости, повышенной вместительности и далее делятся на седаны и легковые [12, 13].

В результате оказалось нарушено основное правило иерархического метода – распределение объектов на одном уровне только по одному признаку. При этом, если в одних слу-

чаях разные признаки характеризуют машины как объект эксплуатации, то в других случаях одни признаки характеризуют объект эксплуатации, а другие – как конструкцию машин.

Также, в классификации грузоподъемных машин (рис. 1, в) на втором уровне подъемники делятся на грузовые и грузопассажирские, а домкраты делятся на гидравлические, винтовые, реечные [12, 13].

Анализ показывает, что в большинстве случаев в классификациях машин применяется, как правило, иерархический метод. Общим недостатком рассмотренных классификаций машин является небольшая глубина классификации, содержащая 2 - 3 уровня.

В целом, системология изделий в отраслях машиностроения, включающая классификации машин, показывает отсутствие: единой классификации изделий и *системного подхода* в построении классификаций (когда в разных подотраслях разрабатываются классификации изделий независимо друг от друга); единого *методического подхода* в построении классификации изделий (практически во всех классификациях изделия рассматриваются только как объекты эксплуатации).

Устранение отмеченных недостатков в классификациях изделий позволит существенно повысить эффективность решения задач машиностроения в цифровизованном производстве.

Системный научно-методический подход к конструированию изделий

Проблема создания единой классификации изделий машиностроения заключается, в первую очередь, в их огромном, непрерывно растущем разнообразии [2 - 5].

При этом одна система классификации должна быть построена для изделий как объектов *эксплуатации*, вторая – для изделий как предметов *производства и обслуживания*, а третья для изделий как объектов *утилизации*.

В этой связи предлагается следующий научно-методический подход для построения системы классификаций изделий на примере изделий, как объектов эксплуатации.

1. Сначала должна строиться классификация *рабочих процессов* для осуществления которых создается изделие. В качестве отличительных признаков должны выступать характеристики, как рабочих процессов, так и условий, в которых они протекают.

2. Затем должны строиться классификации *видов изделий* в осуществлении соответствующих рабочих процессов. В качестве отличительных признаков должны выступать характеристики изделий, напрямую связанные с рабочим процессом.

3. В завершение должна строиться классификация *конструкций* видов изделий. В качестве отличительных признаков должны выступать характеристики конструкций изделий, как объектов эксплуатации.

Предложенный научно-методический подход в построении системы классификации изделий как объектов эксплуатации рассмотрим на примере классификаций транспортных средств.

Система классификаций начинается с классификации рабочих процессов. В данном случае в качестве рабочего процесса выступает процесс транспортировки груза.

В качестве первой группы отличительных признаков должны выступать условия, в которых осуществляется *рабочий процесс – транспортировка груза*, далее разновидности рабочего процесса и их характеристики.

К ним относится вид среды: земная поверхность; вода; воздух; безвоздушное пространство.

Каждый вид среды описывается своими характеристиками. Например, земная поверхность характеризуется дорожным покрытием – грунт, асфальт, снежный покров и др.

Далее учитываются характеристики процесса транспортировки – дальность, скорость, характеристики груза, масса груза.

Ко второй группе отличительных признаков должны относиться *вид транспортного средства*, например, автомобиль, самолет, корабль и т.д. и их эксплуатационные характеристики, например, расход горючего, прочность, долговечность и др.

Третья группа отличительных признаков должна отражать характеристики *конструкции транспортного средства*. Например, пространство для размещения груза: салон, кузов автомобиля и т.д., а также их характеристики.

Аналогично должны строиться классификации изделий, участвующих в других рабочих процессах.

Дальнейшим развитием работ по классификации объектов и процессов в машиностроении должна быть разработка системы классификаций деталей не только как объектов эксплуатации, но и предметов и процессов производства и обслуживания, а также объектов утилизации.

Выводы

Таким образом, с позиций системологии - многоступенчатой системы связанных классификаций, предложен научно-методический подход к кодированию, унификации и стандартизации объектов и процессов при цифровизации этапов жизненного цикла изделий машиностроения.

Системология изделий, как *объектов эксплуатации* включает классификации:

- *рабочих процессов* для осуществления которых создается изделие, в качестве отличительных признаков классификации должны выступать характеристики, как рабочих процессов, так и условий, в которых они протекают;

- *видов изделий* в осуществлении соответствующих рабочих процессов, в качестве отличительных признаков классификации должны выступать характеристики изделий, напрямую связанные с рабочим процессом;

- *конструкций* видов изделий, в качестве отличительных признаков классификации должны выступать характеристики конструкций изделий, как объектов эксплуатации.

Список литературы

1. Дружинин, В. В. Проблемы системологии / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов. – М.: Совет. радио, 1976. – 296с.
2. Базров, Б.М. Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. - М.: Машиностроение, 2001. - 368с.
3. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А.Клименко и др. – Москва: Машиностроение, 2003. – 256 с.
4. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А.М.Русецкого. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 239 с.
5. Конструирование и оснащение технологических комплексов/ А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М.Русецкого. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 316 с.
6. Автоматизация и управление в технологических комплексах/ А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М.Русецкого. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 375 с.
7. Кусакин, Н.А. Менеджмент качества автотракторного ремонтного предприятия / Н.А. Кусакин, М.Л.Хейфец, В.С. Точило.- Новополоцк: ПГУ, 2009.- 180 с.
8. Попок, Н.Н. Мобильная реорганизация машиностроительного производства/ Н.Н. Попок. – Минск: Технопринт, 2001. – 396 с.

9. Базров, Б.М. Метод представления изделия как объекта цифровизации производства структурированным множеством модулей / Б.М. Базров, М.Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. - Т.63, № 3. – С.377-384.

10. Оценка производственной технологичности конструкции в жизненном цикле изделия / Б. М. Базров [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 4. – С. 424–434. DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-424-434>.

11. Bazrov, V.M. Unification of Design Decisions on the Basis of Average Distribution of Probabilities and Introduction of Isolated Areas for Elements of Products Described by Structured Multiple Modules / V.M. Bazrov, M.L. Kheifets, N.N. Popok // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2019, V. 22, No.3. – P.221-232. DOI: <https://doi.org/10.33581/1561-4085-2019-22-3-221-232>.

12. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский. – М.: Наука, 1988. – 640 с.

13. Александров М.П. Грузоподъемные машины / М.П. Александров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана – Высшая школа, 2000. – 552 с.

SYSTEMOLOGY OF OBJECTS AND PROCESSES IN DIGITALIZATION OF THE LIFE CYCLE OF ENGINEERING PRODUCTS

Bazrov B.M.¹, D.Sc. (Engineering), Professor

Kheifetz M.L.², D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mlk-z@mail.ru

Gurevich V.L.³, Ph.D. (Engineering), Ass. Professor.

Solomakho V.L.⁴, D.Sc. (Engineering), Professor

Popok N.N.⁵, D.Sc. (Engineering), Professor

¹Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences., Moscow, Russian Federation

²Institute of Applied Physics of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic Belarus

³Belarussian State Institute of Metrology, Minsk, Republic Belarus

⁴Belarussian State Technical University, Minsk, Republic Belarus

⁵Polotsk State University, Novopolotsk, Republic Belarus

Abstract

The main methods of classification and coding in mechanical engineering are studied from a systemic point of view, their main characteristics are considered. When analyzing the systemology of classifications of machines of various functional purposes, the absence of a unified methodological approach in the construction of the classification and in the coding of products is shown. In existing classifications, products are considered constructively, only as objects of operation, and the other stages of their life cycle are not affected. As a result of the system analysis, a unified methodological approach is proposed for constructing classifications, coding and unification of products for various functional purposes, reflecting the features of all stages of their life cycle.

For the production stages of the life cycle, a system of classifications using various coding methods is considered: a description of structural and technological elements formed by the edges of tools, a sequence of numbers, taking into account signs; a description of the surfaces formed by the movement of the tool, in numbers, indicating the directions of the feed movements; and to describe complex-profile surfaces and a combination of long-range elements, their combination is used. The expediency of using each of the classifications in real production conditions is determined by the statistics of the use of structural and technological elements and surfaces, as well as the tools that form them.

Keywords: systemology, methodological approach, product life cycle, unification, classification, coding, modular technology, constructive and technological element.

УДК 681.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ СИГНАЛА ТЕРМОЭДС ПРИ ОЦЕНКЕ СВОЙСТВ КОНТАКТНЫХ ПАР «СТАЛЬНАЯ ЗАГОТОВКА – ТВЁРДОСПЛАВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ С ПОКРЫТИЕМ»

ТИХОНОВА Жанна Сергеевна¹, к.т.н., e-mail: tikhonovazhs@gmail.com
КРАЙНЕВ Дмитрий Вадимович¹, к.т.н., доцент, e-mail: krainevdv@mail.ru
ФРОЛОВ Евгений Михайлович¹, к.т.н., доцент, e-mail: e_frolov@vstu.ru

¹ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28

Аннотация

Авторами поднята проблема назначения рациональных режимов резания при механической обработке сталей и сплавов твердосплавным инструментом с покрытием. Для ее решения путем получения оперативной информации о свойствах каждой контактной пары «инструмент с покрытием-заготовка» авторами предлагается использовать величину сигнала термоЭДС (мВ) естественной термодопары, зафиксированную во время пробного прохода. В качестве обоснования практической значимости предложенного метода приведены теоретические основы и результаты исследования информативности сигнала термоЭДС при оценке физико-механических свойств контактных пар «стальная заготовка – твердосплавный инструмент с покрытием» для назначения рациональных режимов обработки.

Ключевые слова: термоЭДС, рациональные режимы резания, токарная обработка, пробный проход.

Введение

Справочно-нормативная литература до сегодняшнего времени не располагает аналитическими моделями расчёта допустимой скорости резания при использовании твердосплавных инструментов с покрытиями, в которых бы учитывались повышенные, но переменные режущие свойства этого вида инструмента. В настоящее время фирмы-поставщики для каждой группы поставляемых инструментов с покрытием рекомендуют свой табличный способ назначения рациональной скорости резания, основанный на использовании среднестатистического значения начальной (табличной) скорости резания и поправочных коэффициентов, учитывающих условия обработки. Это механические свойства обрабатываемой группы сталей, задаваемый период стойкости инструмента, значение подачи и глубины резания, ряд поправок на геометрию резцов. Под термином рациональная скорость принимается то её расчётное значение, которое в совокупности с принятой подачей, глубиной резания и выбранными условиями обработки, обеспечивает заданное время надёжной работы инструмента (количество обработанных деталей). В методиках назначения скорости резания зарубежных фирм-поставщиков, в целях обеспечения надёжности выбираемой скорости резания для задаваемого периода стойкости, её начальное (табличное) среднестатистическое значение ориентировано не только на химический состав покрытия, но и на физико-механические свойства твердосплавной матрицы, которые она имеет на верхней границе по углероду внутри его двухфазной области. Для примера на рисунке 1 для сплава ВК10 это 6,53 весовых процента. Сплавы, с содержанием углерода менее 6,53 весовых процента до нижней границы двухфазной области, т.е. до значения 6,22 будут иметь

улучшенные свойства, что является гарантией надёжности, выбранной по методикам фирм скорости резания. Этот «запас» надёжности чаще всего реализуется обработкой дополнительного количества деталей при сохранении начальных режимов обработки (или увеличением стойкости инструмента). Если заводы-изготовители в своих методиках выбора начальной (табличной) скорости резания для сплавов с покрытиями ориентированы на свойства твёрдосплавной матрицы с двухфазной областью, то они рекомендуют более высокие скорости резания. Если методики ориентированы на использование твёрдосплавной матрицы с трехфазной областью ($WC+\gamma+C$), т.е. с содержанием графита, соответственно рекомендуются пониженные скорости обработки.

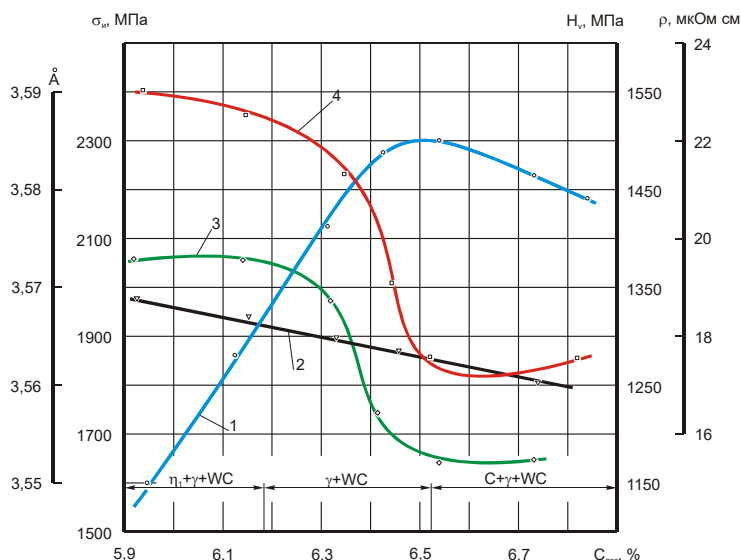


Рисунок 1 – Влияние содержания углерода на свойства сплава BK10 [1]

1 – предел прочности при изгибе $\sigma_{и}$. 2 – твердость по Виккерсу H_V , – период решетки кобальтовой фазы, Å ; 4 – электрическое сопротивление сплава ρ , мкОм·см.

В таблице 1 приведены результаты обработки стали ШХ-15 (Группа «Р») на допустимых (рекомендованных производителем) скоростях резания твёрдосплавными инструментами с износостойкими покрытиями различных фирм-поставщиков по их рекомендациям для одинаковых условий обработки (подача - 0,12 мм/об, глубина резания 1мм, резание без СОЖ). Принятая стойкость 15 минут.

Таблица 1 – Результаты обработки стали ШХ-15 (Группа «Р») на скоростях резания, рекомендованных производителем

Марка твердого сплава с покрытием	ВР20АМ ОАО «КЗТС»	ОАО «САНДВИК-МКТС».	PRAMET
Скорость резания, рекомендованная производителем	100 м/мин	150 м/мин	190 м/мин
Фактический диапазон разброса стойкости	13-16 мин	15 – 18 мин	15 -20 мин

Наблюдается большая разница в значениях рекомендованных производителем допустимых скоростей, которые обеспечивают задаваемую стойкость. Это напрямую указывает на различный уровень режущих способностей инструмента. Под режущими свойствами инструмента понимается функция комплекса факторов, к числу которых относятся: свойства инструментального материала, включающие в себя химический состав (марка материала), структурное состояние, твердость, пределы прочности на растяжение, изгиб и сжатие, температуростойкость (красностойкость), износостойкость. Кроме того, авторами при проведении стойкостных испытаний выявлено отклонение фактической стойкости твёрдосплавных пластин от задаваемой как в сторону увеличения её, так и в сторону снижения (таблица 1). Для повышения точности определения скорости резания и рационального использования режущих способностей инструмента необходимо иметь оперативную информацию о свойствах каждого твердосплавного инструмента с покрытием в сочетании с обрабатываемой заготовкой. В связи с этим при разработке способа оперативной диагностики режущих свойств этого класса инструмента необходимо иметь информацию о свойствах матрицы и свойствах покрытий, либо иметь интегральную оценку свойств твердосплавной матрицы и многослойного покрытия.

Для получения оперативной информации о свойствах каждой контактной пары «Инструмент с покрытием-заготовка» авторами предлагается использовать величину сигнала термоЭДС (мВ) естественной термопары, всегда сопутствующей процессу резания. Для этого предлагается рассмотреть физические основы ее возникновения (эффект Зеебека), а также изучить информативность данного метода при оценке свойств твердосплавного инструмента с покрытием.

Из эффекта Зеебека следует, что в замкнутой электрической цепи, составленной из последовательно соединенных твердосплавного инструмента и стальной детали, при поддержании разности температур горячего спая (a) и холодного спая (b) возникает термоэлектродвижущая сила E (рисунок 2).

В небольшом интервале изменения температуры в зоне резания значение термоЭДС (E) представляется в следующем виде:

$$E = (\alpha_a - \alpha_b) \cdot (\theta_a - \theta_b) = \alpha_{1-2} \cdot (\theta_a - \theta_b), \quad (1)$$

где α_a, α_b – удельные величины термоЭДС двух различных материалов термоэлемента, мВ;

θ_a, θ_b – температура, $^{\circ}\text{C}$ в точках a и b соответственно.

α_{1-2} – удельная или дифференциальная термоЭДС для данной пары, зависящая от природы контактируемых тел.

При этом необходимо иметь ввиду, что результирующее значение удельной термоЭДС пары складывается из трех составляющих: фоновой, объемной и контактной и следует оценить вклад каждой из них в величину E ,

$$\alpha_{1-2} = \alpha_{\text{ф}} + \alpha_{\text{об}} + \alpha_{\text{к}}, \text{ мВ}. \quad (2)$$

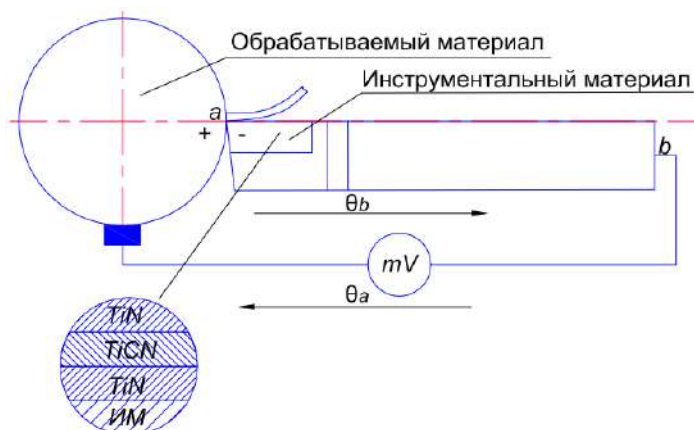


Рисунок 2 – Электрическая цепь естественной термопары

Вблизи конца проводника с большей температурой увеличивается энергия тепловых колебаний атомов, что приводит к распространению колебаний в сторону холодного конца. Фононы - кванты энергии колебаний кристаллической решетки, сталкиваясь с электронами, передают им часть своей энергии и как бы увлекают их за собой, создавая направленное движение носителей тока от более нагретого конца проводника к более холодному. Фононная составляющая α_{ϕ} , то есть эффект увлечения электронов фононами, существенное влияние на результирующее значение удельной термоЭДС пары оказывает только в интервале низких температур, когда температура резания ниже температуры Дебая. Для сталей и стальных сплавов температура Дебая $\approx 350-400$ °С.

В режиме пробного прохода при обработке металлов твёрдосплавными инструментами уровень температур в зоне резания находится в интервале 500–550 °С, поэтому влияние фононной составляющей α_{ϕ} можно не учитывать.

Объемная составляющая термоЭДС определяется образованием направленного движения носителей тока в проводнике при наличии градиента температур. Дифференциальная термоЭДС, соответствующая этой составляющей с учетом рабочих температур зоны резания, так же будет мала и её влиянием можно пренебречь.

Контактная составляющая удельной термоЭДС обусловлена зависимостью контактной разности потенциалов от температуры, связанной с зависимостью химического потенциала μ от температуры. Из условия выравнивания электрохимических потенциалов электронов в контактируемых поверхностях металлов следует, что:

$$\alpha_k = \frac{\mu_1 - \mu_2}{e} = \frac{\chi_2 - \chi_1}{e}, \text{ мВ} \quad (3)$$

- где μ_1 – уровень химического потенциала материала детали;
- μ_2 – уровень химического потенциала материала инструмента.
- χ_2 – работа выхода электронов из детали;
- χ_1 – работа выхода электронов из твердого сплава;
- e – заряд электрона.

Анализ выражения (3) показывает, что в условиях пробного прохода при постоянных режимах резания различная величина термоЭДС пары «твёрдосплавный инструмент с

износостойким покрытием – стальная заготовка» определяется разностью работ выхода электронов из стали и твердого сплава, то есть величиной α_k и разностью температур горячего и холодного спая естественной термопары. При смене хотя бы одного элемента естественной термопары величина термоЭДС новой контактной пары может оказаться другой по причине неизбежного, но допустимого по техническим условиям изготовления диапазона разброса химического состава материалов её ветвей и вероятностного характера образования контактных пар. Таким образом можно получить информацию о свойствах каждой контактной пары в реальных условиях работы токарного станка

В работе [2], показана возможность применения величины работы выхода электронов из металлов как метода физико-химического анализа. В работе подчёркнуто, что работа выхода чувствительна к объемным изменениям в сплавах при изменении состава, структуры и образования новых фаз и отражает, наряду с другими свойствами металлов (плотностью, температурой плавления, модулем упругости, электропроводностью, теплопроводностью) силу межатомной связи.

Также в многочисленных публикациях [3-5] указано на тесную корреляционную связь между величиной термоЭДС естественной термопары и свойствами составляющих её ветвей, что позволяет применить всегда сопутствующий процессу резания термоэлектрический эффект с использованием контактной составляющей удельной термоЭДС пробного прохода для диагностирования свойств многокомпонентных контактных пар. Информация об использовании величины термоЭДС контактных пар, составленных из твёрдосплавных инструментов с покрытиями и стальных заготовок для оценки их свойств, в технической литературе отсутствует. Учитывая всё возрастающий объём использования этого вида инструмента, разработка способов получения такой информации является актуальной задачей. При этом важно выявить, как влияет химический состав однослойного или многослойного покрытия на величину термоЭДС пробного прохода.

Понимание физической основы генерирования термоЭДС согласно работе А.А. Улановского [6] в проводниках делает очевидными три основных правила (закона) обращения с термоэлектрическими цепями. Это «Правило промежуточных металлов» (закон аддитивности показаний по материалам), «Правило Магнуса (закон однородной цепи)», «Правило последовательных температур» (закон аддитивности показаний по температуре). Наибольший интерес вызывает «Правило промежуточных металлов». Рассмотрим его подробнее: «алгебраическая сумма термоЭДС в цепи, состоящей из любого числа различных проводников, равна нулю, если вся цепь находится при одной температуре»:

$$E_{ac}(\theta_a, \theta_b) = E_{ab}(\theta_a, \theta_b) + E_{bc}(\theta_a, \theta_b) = 0.$$

Из закона следует важное практическое свойство термопар: введение в цепь, состоящую из двух разнородных проводников a и b , спаи которых находятся при температурах θ_a и θ_b , третьего проводника c , имеющего постоянную температуру по всей своей длине (например, θ_1 или θ_2), не изменит термоЭДС $E_{ab}(\theta_a, \theta_b)$.

Описание теоретических или экспериментальных исследований

В рамках данной работы авторами предлагается изучить возможность использования, предложенного выше тестового метода оценки свойств контактных пар, применительно к условиям обработки сталей твёрдосплавным инструментом с износостойкими покрытиями. Поставлена задача выявить влияние как однослойного, так и многослойного покрытия на уровень генерирования сигнала термоЭДС пробного прохода и применимость правила аддитивности термоЭДС естественной термопары к сплавам с покрытиями.

Для этого предлагается рассмотреть электрическую цепь естественной термопары (контактную зону), составленную из обрабатываемой стальной детали и твёрдосплавного инструмента с многослойным покрытием изображённую на рисунке 2. Для примера рассмотрим контактную пару сталь 40Х – твёрдый сплав ТС20 РТ Кировоградского завода твёрдых сплавов.

Обратим внимание, что в электрической цепи (контактной зоне) находится твёрдосплавная пластинка группы ТТК (матрица) с нанесённым четырёхслойным покрытием. Химический состав матрицы и каждого слоя покрытия указан на рисунке 2.

На первый взгляд изображённые схематично слои покрытия не должны по правилу аддитивности влиять на показания измерительного прибора или осциллографа.

В таблице 2 представлены значения параметра термоЭДС при токарной обработке стали 45 в режиме пробного прохода одними и теми же твердосплавными пластинами с износостойкими покрытиями и с удалёнными с них покрытиями.

При проведении эксперимента в первую очередь измерялся сигнал термоЭДС пластины с покрытием. Затем проводилось удаление покрытия на режущих поверхностях пластины, после чего этой же пластиной производилась повторная обработка в режиме пробного прохода с фиксированием сигнала термоЭДС твердосплавной пластины теперь уже без покрытия.

Таблица 2 – Значения величины термоЭДС при токарной обработке стали 45 в режиме пробного прохода твердосплавными пластинами с износостойкими покрытиями и без покрытий

Показатели	Марка твердого сплава				
	T15K6	T5K10	BK8	MKTC	ТС 20РТ(КЗТС)
	Однослойное покрытие			Многослойное покрытие	
	<i>TiN</i>	<i>TiN</i>	<i>TiN</i>		
<i>E</i> , мВ	10,1	12,4	14,6	7,8	7,2
	Без покрытия				
<i>E</i> , мВ	11,2	13,6	15,3	9,2	9,0

Результаты и обсуждение

Проведённые эксперименты по точению сталей в режиме пробного прохода твёрдосплавными инструментами с покрытием и без него показали:

1. Правило аддитивности не соблюдается применительно к данным условиям металлообработки, потому что вся цепь (контактная зона) не имеет одинаковой температуры, что многократно показано измеренными изотермами на передней и задней поверхности инструмента (рисунок 3).

2. Уменьшенное значение термоЭДС пробного прохода твёрдосплавных пластин с однослойным и многослойным покрытием есть следствие того, что нанесение покрытий привело к образованию модифицированного многокомпонентного слоя на режущих поверхностях, способствовало созданию плавного перехода между слоями покрытия и матрицы с изменением их химического состава и физико-механических свойств. Т.е. величина сигнала термоЭДС в данном случае выступает в качестве интегральной характеристики, оценивающей свойства как матрицы, так и покрытия и может быть введена в структуру известных математических моделей для расчета скорости резания [8].

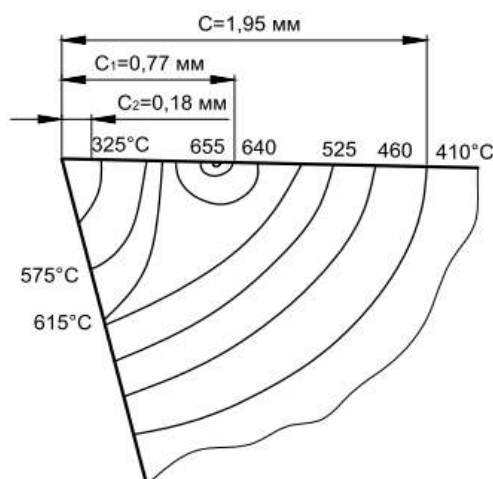


Рисунок 3 – Схема распределения температуры на передней и задней поверхности инструмента [7]

3. Для расчета скорости резания на стадии полустойковой токарной обработки предлагается предусматривать операцию пробного резания [9], т.е. предварительно обрабатывать металл (стальную заготовку) и измерять термоЭДС в паре «инструмент с покрытием – заготовка». Далее по величине термоЭДС данной пары и рабочим параметрам технологического процесса (подаче s , глубине резания t и задаваемой стойкости T) определять допустимую скорость резания, обеспечивающую задаваемую стойкость по следующей формуле в общем виде (4):

$$V = \frac{C_v' \cdot E^{p_v}}{t^{x_v} \cdot s^{y_v} \cdot T^m}, \quad (4)$$

где $C_v' = 559^{2.778}$; $p_v = -2.778$; $x_v = 0.83$; $y_v = 0.556$; $m = 2.778$; E – термоЭДС каждой контактной пары «твердосплавный инструмент с износостойким покрытием – стальная заготовка», T – задаваемая стойкость в минутах, s – подача в мм/об; t – глубина резания в мм, V – скорость в м/мин.

Отличие формулы (4) от рекомендованной справочно-нормативной литературой [8] состоит в том, что постоянное значение скоростного безразмерного коэффициента C_v определяется оперативно для каждой новой контактной пары непосредственно на станке перед началом работы и приобретает физический смысл как обобщённая энергетическая величина, характеризующая сочетание физико-механических (теплофизических) свойств контактной пары.

Ещё одно отличие скорректированной формулы по сравнению с существующими проявляется в том, что она позволяет решить, как прямую задачу выбора надёжного значения скорости резания, так и обратную. То есть по выбранной скорости резания, принятым величинам подачи и глубины резания и величине термоЭДС пробного прохода определять (прогнозировать) время надёжной работы резца по зависимости:

$$T = \frac{559 \cdot E^{-1}}{t^{0.3} \cdot s^{0.2} \cdot V^{0.4}}, \quad (5)$$

где E – термоЭДС каждой контактной пары «твердосплавный инструмент с износостойким покрытием – стальная заготовка», T – задаваемая стойкость в минутах, s – подача в мм/об; t – глубина резания в мм, V – скорость в м/мин.

Выводы

Предложена и подтверждена, для обработки сталей твердосплавным инструментом с покрытием, гипотеза о применимости известного способа оценки свойств контактной пары «твердосплавный инструмент без покрытия – обрабатываемый материал» по величине термоЭДС пробного прохода.

Авторами исследована особенность образования электрической цепи термоЭДС пробного прохода при использовании твердых сплавов с покрытием и установлено, что правило аддитивности о не влиянии промежуточных слоёв покрытий на показания измерительного прибора не соблюдается. Величина термоЭДС пробного прохода фиксирует изменение химического состава, появление новых фаз и может использоваться для предварительной оценки физико-механических свойств контактных пар «стальная заготовка – твердосплавный инструмент с покрытием».

Значение термоЭДС пробного прохода, введенное в структуру математической модели расчёта скорости резания или расчёта периода стойкости модели, используется не как величина температуры резания, а как интегральная характеристика сочетания свойств контактной пары «собранной» случайным образом.

Список литературы

1. Третьяков В. И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1976. – 527 с.
2. Плотников, А.Л. Использование информативной способности сигнала естественной термодомы для обеспечения надёжности автоматизированного определения режимов лезвийной обработки / А.Л. Плотников, А.С. Сергеев, Н.Г. Зайцева // Научноёмкие технологии в машиностроении. - 2013. - № 5. - С. 35-40.
3. Плотников А.Л. Автоматизированные способы определения значений параметров процесса токарной и фрезерной обработки на станках с ЧПУ: Монография /Плотников А.Л., Сергеев А.С., Уварова Т.В.- Волгоград; Старый Оскол: Тонкие научноёмкие технологии (ТНТ), 2017 – 211 с.
4. Плотников, А. Л. Обеспечение надёжности работы сборного многолезвийного твердосплавного инструмента на автоматизированном станочном оборудовании / А. Л. Плотников, Е. Г. Крылов //Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – № 3. – С. 40-44.
5. Соломенцев Ю.М. Способ определения режущих способностей инструментов. А.С. №347629 – Б.И. 1971, №8.
6. Улановский А.А. [Электронный ресурс]: Использование термоэлектрического эффекта Зеебека для измерения температуры. - Электрон.дан. - «Обнинская термоэлектрическая компания».
7. Талантов Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.
8. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1/ под ред. А.М.Дальского, А.Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова – 5-е изд. исправленное – М.: Машиностроение, 2003. – 912 с.
9. Плотников А.Л. Проблемы и перспективы решения технологических задач управления процессом резания или как научить систему ЧПУ токарного станка определять надёж-

ные значения параметров обработки / А.Л. Плотников, Е.М. Фролов, А.А. Жданов, Ж.С. Тихонова//Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивныетехнологииивмашиностроении. - Волгоград, 2020. - № 3 (238) Март. - С. 45-48.

INVESTIGATION OF THE INFORMATIVENESS OF THE THERMOEMF SIGNAL WHEN EVALUATING THE PROPERTIES OF CONTACT PAIRS "STEEL BILLET-COATED CARBIDE TOOL"

TIKHONOVA Zh.S., Ph.D. (Engineering), e-mail: tikhonovazhs@gmail.com

KRAYNEV D.V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: krainevdv@mail.ru

FROLOV E.M., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: e_frolov@vstu.ru

Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation

Abstract

The authors raised the problem of assigning rational cutting modes for machining steels and alloys with a coated carbide tool. To solve it, the authors propose to use the value of the thermoEMF signal (mV) of a natural thermocouple, recorded during a test pass, to obtain operational information about the properties of each contact pair "coated tool-workpiece" and adjust the processing modes. As a justification of the practical significance of the proposed method, the theoretical foundations and results of the study of the informativeness of the thermoEMF signal when evaluating the properties of contact pairs "steel billet – coated carbide tool" are presented.

Keywords: thermoEMF, rational cutting modes, turning, trial pass.

УДК 621.91, УДК 658.5

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РИСКОВ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СБОРНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

*АРТАМОНОВ Евгений Владимирович¹, доктор техн. наук, профессор,
e-mail: artamonov@tyuiu.ru*

*ВАСИЛЕГА Наталья Александровна² аспирант ТИУ,
e-mail: vasilegana@tyuiu.ru*

^{1,2} Тюменский индустриальный университет, 625000, Россия, Тюменская область, г. Тюмень, ул. Володарского, 38

Аннотация

Представлены результаты исследования методов оценки рисков, применяемых на промышленных предприятиях, для выявления оптимальной базы, используемой при разработке методики оценки рисков и возможностей при эксплуатации сборного режущего инструмента. Сформирован план работы команды для сбора информации по рискованным ситуациям, в том числе для выявления причин и последствий различных видов рисков, а также разработан алгоритм оценки рисков и возможностей в процессе обработки металлов резанием и их численная интерпретация.

Ключевые слова: металлорежущий инструмент, работоспособность сборного режущего инструмента, методика оценки рисков и возможностей, численная интерпретация рисков и возможностей, обработка металлов резанием.

Введение

Процесс обработки металлов резанием является сложным и многофакторным. В ходе выполнения различных операций обработки металлов резанием возникают риски, наступление которых может привести к существенным временным и финансовым потерям [1-4]. Для предотвращения рискованных ситуаций и реализации возможностей в процессе резания с использованием сборного режущего инструмента, необходимо разработать методику оценки рисков и возможностей [5] для определенных конструкций инструмента и технологических процессов.

Анализ существующих методов оценки рисков и определение их основных этапов

Процесс оценки рисков и выявления потенциальных возможностей в ходе работы сборных режущих инструментов, представляет собой комплекс мер, которые позволяют осуществлять сбор и анализ информации, позволяющей определить уровень риска, степень его влияния, тяжесть последствий, а также произвести его градацию. Для этого необходимо использовать специализированную методику, которая позволит выстроить систему выявления рисков и способы воздействия на них. Как правило, внедрение на предприятии подобных систем требует значительных финансовых затрат, поэтому для разработки методики оценки рисков и возможностей за основу следует принять наиболее распространенную на сегодняшний день методику оценки рисков.

В ходе анализа методов оценки рисков, применяемых на предприятиях различных отраслей промышленности, были выявлены самые популярные из них, результаты опроса ведущих предприятий представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты опроса

Наименование метода	металлургия	машиностроение	нефтегазовый сектор	транспорт
Исследование опасности и работоспособности (HAZOP)	8 %	0 %	2 %	0 %
Оценка токсичности	8 %	0 %	2 %	0 %
Структурированная техника "Что, если" (SWIFT)	16 %	21 %	13 %	31 %
Анализ сценариев	8 %	3 %	2 %	10 %
Анализ влияния на бизнес	0 %	6 %	8 %	7 %
Анализа видов и последствий отказов (FMEA)	67 %	79 %	92 %	41 %
Анализ причин и следствий	8 %	0 %	1 %	0 %
Другие	33 %	18 %	4 %	38 %

Согласно данным таблицы на предприятиях различных отраслей промышленности самым распространенным методом оценки рисков является метод Анализа видов и последствий потенциальных отказов (FMEA). Таким образом, с учетом сложности внедрения новых методов оценки рисков и больших расходов, целесообразно модернизировать метод FMEA для работы как с рисками, так и с возможностями.

В ходе оценки рисков при эксплуатации сборного режущего инструмента необходимо определить структуру процесса оценки рисков в целом. Для этого выделим ряд этапов, представленных на рисунке 1. При этом в ходе анализа и оценки риска могут быть выявлены возможности.



Рисунок 1 – Этапы оценки риска

Для всесторонней оценки рисков события предварительным этапом должны проводиться консультации экспертов и обмен информацией, а также следует установить область применения системы оценки риска [6].

При соблюдении всех этапов системы оценки рисков следует провести оценку работы сборного режущего инструмента.

Разработка методики оценки рисков и возможностей при эксплуатации сборного режущего инструмента

Методика оценки рисков и возможностей основана на принципах методики FMEA, которая является наиболее распространенной на большинстве предприятий, в том числе отрасли машиностроения. Благодаря этому организации смогут минимизировать расходы на внедрение новых методов управления рисками, при этом получив возможность управления рисками и потенциальными возможностями без продолжительного обучения сотрудников.

Для начала работы по оценке рисков и возможностей необходимо собрать команду (РиВ-команда) из ведущих специалистов предприятия и назначить ведущего. Так же для всесторонней оценки факторов, влияющих на риски при эксплуатации сборных режущих инструментов, могут быть привлечены эксперты сторонних организаций. Этапы создания РиВ-команды, выявления рисков и возможностей и определения их причин и последствий представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Алгоритм работы РиВ-команды

При формировании РиВ-команды для учета всех возможных рисков необходимо привлечь специалистов конструкторского отдела, технологического цеха, а также сотрудников проектного бюро. Между каждым членом команды должны быть распределены полномочия и назначены ответственные лица, что позволит решать вопросы структурирования деятельности и распределения управленческих функций при работе с рисками и возможностями по

каждому процессу [7]. Для четкого распределения функций между членами РиВ-команды необходимо разработать матрицу ответственности.

Главной особенностью разрабатываемой методики является выделение возможностей и их дальнейшее использование. С этой целью для оценки рисков факторов, возникающих в ходе процесса резания, разработана шкала баллов значимости (S), которая дает возможность дифференцировать риски и возможности для одновременного их оценивания.

Согласно базовой методике выставление ранга при отрицательном значении риска, определяется по 10-балльной шкале, где один балл стандартно означает отсутствие последствий, а десять баллов – неприемлемый уровень последствия [8].

При анализе возможностей в модернизированной методике ранг значимости определяется тоже по десятибалльной шкале, но с отрицательным знаком.

В результате работы экспертов группы выставляются оценки значимости последствий при наступлении либо риска, либо возможности. При этом по рангу вероятности возникновения рисков и возможностей необходимо определить их уровень. Для этого требуется выполнить математическое вычисление по перемножению значимости (S) и вероятности возникновения (O).

Алгоритм работы РиВ-команды в ходе численной оценки рисков и возможностей при эксплуатации сборных режущих инструментов представлен в виде блок-схемы на рисунке 3.

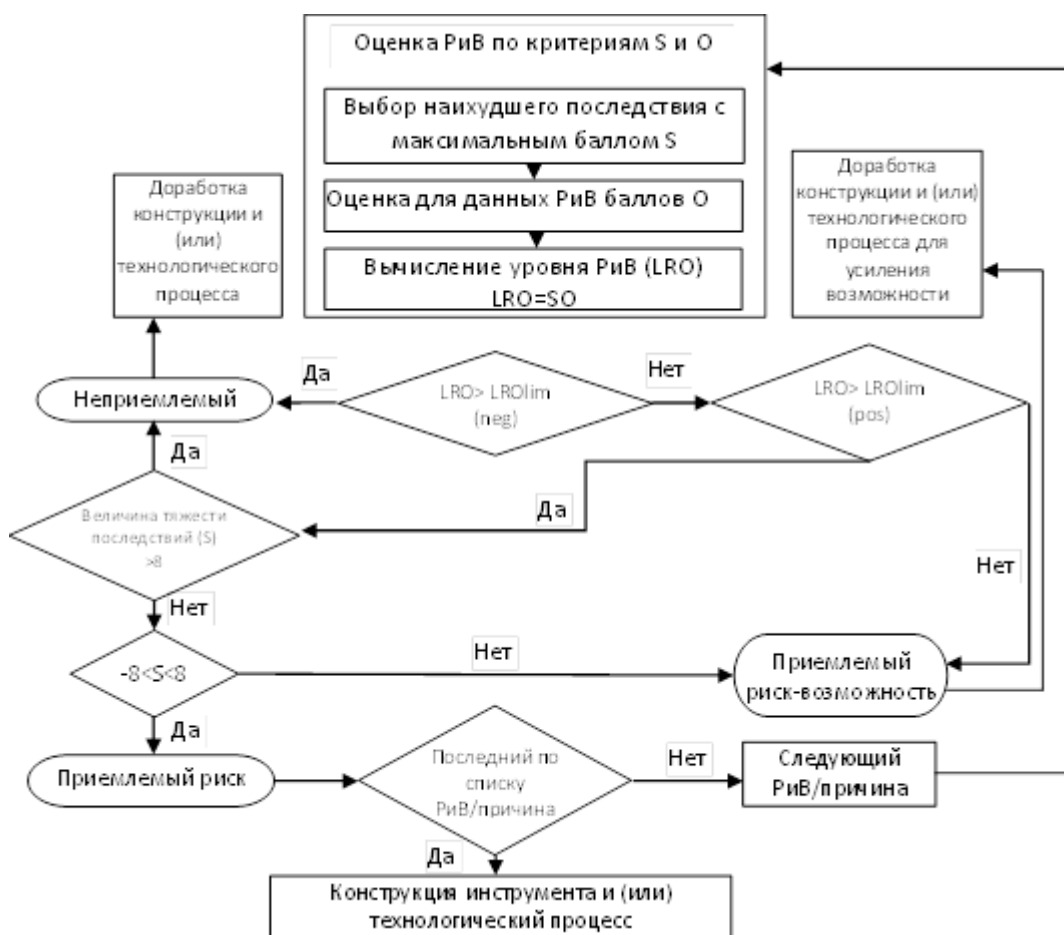


Рисунок 3 – Численная оценка рисков и возможностей

В процессе работы члены команды оценивают предложенные проекты конструкции инструмента и (или) технологического процесса, определяют наихудшее последствие с максимальным баллом, выявляя тем самым потенциальные риски либо возможности. В ходе оценки формируется список возможных причин возникновения риска и его последствий. После назначения экспертами рангов и выставления оценок значимости последствий рисков и возможностей и вероятности их возникновения, рассчитывается уровень риска и возможности LRO (the level of risk and opportunity) путём перемножения баллов значимости (S) и вероятности возникновения (O).

Если полученное значение LRO больше предельного критического, то риск является неприемлемым, как и в случае, когда величина тяжести последствия $S > 8$. При этом если величина тяжести последствий S находится в пределах $-8 < S < 8$, то риск считается приемлемым. В случае, когда полученный экспертами LRO больше предельного позитивного значения либо меньше предельного негативного, то необходимо провести дополнительную оценку величины тяжести последствий для присвоения риску определенного уровня. В противном случае риск можно рассматривать как приемлемый риск-возможность.

Выводы

Разработана методика оценки рисков и возможностей при эксплуатации сборного режущего инструмента для которой, в качестве основы, был взят метод анализа видов и последствий потенциальных отказов (FMEA). Данный метод является самым распространенным на предприятиях различных отраслей. Также составлен алгоритм оценки рисков и возможностей в процессе обработки металлов резанием и их численная интерпретация

Список литературы

- 1 Tveryakov, A. M. Setup for Determining the Maximum Temperature for Increased Performance Longevity of Replaceable Cutting Discs / A. M. Tveryakov, A. S. Shtin // 10th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS). – Ekaterinburg, RUSSIA. – MAY 16-20. – 2016
- 2 Vasilega, D.S. Method for the determination of hard alloys' maximum performance temperature in the context of the metal-cutting tools' usage quality estimation technique / D.S. Vasilega, A.S. Shtin // Key Engineering Materials. – 2017 – pp 59-63
- 3 Artamonov, E.V. Determining the maximum-performance temperature of hard-alloy cutting plates / E.V. Artamonov, D.S. Vasilega, A.M. Tveryakov // Russian Engineering Research. – Т. 4. – 2014. – pp 402-404
- 4 Artamonov, E.V. Determining the optimal cutting speed in turning by composite cutters on the basis of the chip / E.V. Artamonov, D.V. Vasil'ev // Russian Engineering Research – Т. 34. – 2014, pp 404-408
- 5 Klochkov, Y. Development of FMEA method with the purpose of quality abebment of can stock production / Y. Klochkov, A. Its, I. Vasilieva, // Key Engineering Materials. – 2016. – № 684. – pp. 473-476. – doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.684.473
- 6 Василега, Д.С. Разработка методики оценивания рисков и возможностей в соответствии с требованиями стандарта ISO 9001:2015 / Д.С. Василега, М.С. Остапенко, Н.А. Василега // Естественные и технические науки. – 2019. № 5 (131). – С. 183-188. – Текст : непосредственный.
- 7 Ostapenko, M.S. Method of evaluation of quality of metal-cutting tool / M.S. Ostapenko, D.S. Vasilega // Applied Mechanics and Materials – 379. – 2013 – pp 49-55
- 8 Клочков, Ю.С. Модель современной процедуры FMEA / Ю.С. Клочков // Казанская наука. – 2010. – № 12. – С. 42-45. – Текст : непосредственный.

METHODOLOGY FOR ASSESSING RISKS AND OPPORTUNITIES IN THE OPERATION OF PREFABRICATED CUTTING TOOLS

Artamonov E.V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: artamonovev@tyuiu.ru
Vasilega N.A., postgraduate, e-mail: vasilegana@tyuiu.ru

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education « Industrial University of Tyumen», 625000, Russia, Tyumen region, Tyumen, Volodarsky str., 38

Abstract

The process of metal processing by cutting is complex and multifactorial. During the execution of various metal cutting operations, risks arise, the occurrence of which can lead to significant financial losses. To prevent risks and identify opportunities in the process of metal cutting, a methodology for assessing risks and opportunities has been developed. The most common method of risk assessment, the Failure mode and effects analysis, was chosen as the basis for developing a methodology for assessing risks and opportunities.

The main feature of the developed methodology is the allocation of opportunities and their further use. For this purpose, a scale of significance points (S) has been developed to assess the risk factors that arise during the cutting process, which makes it possible to differentiate risks and opportunities for their simultaneous assessment.

Keywords: metal-cutting tools, the performance of a prefabricated cutting tool, the methodology for assessing risks and opportunities, numerical interpretation of risks and opportunities, metal cutting.

УДК 621.9.047

УСТАНОВЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ СООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ РЕЖИМНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ И ЭРОЗИОННЫМ РАЗРУШЕНИЕМ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ ПРИ ПРОШИВКЕ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА

*ВАСИЛЕВСКАЯ Светлана Игоревна, к.т.н., ст. преподаватель,
vasilevskaya@corp.nstu.ru*

*НИКИТИН Юрий Вадимович, к.т.н., доцент,
nikitin@corp.nstu.ru*

Новосибирский государственный технический университет,
630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Аннотация

Внедрение современных электрофизических методов формообразования поверхностей малых геометрических размеров в труднообрабатываемых материалах позволяет реализовать новые технические решения при конструировании различного рода объектов. Перспективным представляется комбинирование процессов различной физической природы в одной обработке. Так для прошивки отверстий малого диаметра предложено использовать электроэрозионно – электрохимическую обработку. В данной работе дана количественная оценка соотношений между режимными параметрами электрических импульсов и эрозионным разрушением обрабатываемого материала электроэрозионным процессом в комбинированной обработке при формообразовании отверстий диаметром менее 1 мм. В работе показано, что значение величины межэлектродного промежутка значительно влияет на значение удельной эрозии. Показано, что величина накопительно-разрядного конденсатора лимитирована значением пробойного напряжения на электродах, необходимого для организации канала разряда. Отмечено, что в комбинированной электроэрозионно-электрохимической обработке для формообразования глубоких отверстий малого диаметра необходимо использовать отделочные режимы электроэрозионного процесса.

Ключевые слова: комбинированная обработка, количественная оценка, импульсное напряжение, формообразование отверстий малого диаметра, катод – инструмент, длительность импульса, импульсы высоковольтного напряжения, период следования импульсов.

Введение

Современное развитие техники, используемой в различных отраслях промышленного производства, медицине, биомолекулярной технике и др. ориентировано на создание сложных систем, осуществляющих определенные процессы и технологии. При конструкторской реализации подобных систем в виде оборудования, отдельных механизмов, устройств зачастую предъявляются высокие требования по точности и качеству обработки исполнительных поверхностей деталей, входящих в их состав. Необходимость создания технических систем, эксплуатация которых происходит в условиях повышенных силовых и температурных нагрузок в присутствии агрессивных сред требует поиска технологических методов формообразования исполнительных поверхностей на деталях, конструкции которых выполнены из высокопрочных, коррозионностойких, жаропрочных металлов и сплавов. Разработка уникальных

технологий в различных областях деятельности человека предопределила необходимость получения изделий малых размеров, что, в свою очередь, требует поиска технологических методов их создания. Распространенной задачей, возникающей при изготовлении подобных изделий, является необходимость обработки глубоких отверстий диаметром менее 1 мм.

Примерами подобного рода изделий являются:

- топливные форсунки авиационных, газотурбинных и дизельных двигателей, которые обеспечивают необходимую подачу топлива в камеру сгорания;
- фильтры для изготовления тонких углеродных волокон;
- фильтры тонкой очистки;
- изделия приборостроения и медицинской техники.

В настоящее время при обработке таких отверстий применяется совокупность электрофизикохимических технологий, которые представлены такими методами формообразования как электроэрозионный, лазерный, электронно-лучевой, ультразвуковой, и электрохимический.

В последние годы эффективно развиваются комбинированные методы, основанные на сочетании различных физических и химических процессов. Одним из таких методов является электроэрозионно-электрохимическая обработка. Перспективы и возможности комбинированной обработки на основе электрохимических и электроэрозионных процессов для реализации технологических задач по формообразованию отверстий малого диаметра в деталях, представлены в работах [1, 2].

Действующие в комбинированной обработке процессы электрохимического и электроэрозионного удаления материала из межэлектродного зазора (МЭЗ) имеют разные механизмы формирования отверстия, однако, в обоих методах наблюдается определенная общность в их реализации. Так, электроэрозионные и электрохимические процессы реализуются на МЭЗ, имеющих один порядок величины. Несмотря на различие используемых технологических сред (электролит – для электрохимической и диэлектрическая жидкость – для электроэрозионной составляющей), они имеют общее предназначение – эвакуацию продуктов из МЭЗ. Немаловажным является и единство схемы формообразования обрабатываемой поверхности – копирование формы катода-инструмента, перемещающегося со скоростью движения подачи.

Авторы в работах [3 – 14] показали подходы к формированию физической модели процессов, происходящих при пропускании электрических импульсов через межэлектродный зазор. В данных исследованиях на основании анализа вольт – ампер – временных и вольт – амперных характеристик установлено наличие в периоде импульсного разряда в электролите двух стадий, характеризующих электрохимические и электроэрозионные явления в межэлектродном зазоре. Показано, что с момента подачи импульса напряжения наблюдается увеличение тока в соответствии с законом Ома, при этом происходит сопутствующее заполнение межэлектродного зазора газообразными продуктами электролиза. Последнее увеличивает электрическое сопротивление столба электролита, что на определенной стадии действия импульса приводит к снижению анодного тока. При достижении напряжения в импульсе критического значения происходит пробой изолирующего слоя. Время между началом действия импульса и моментом пробоя определяет длительность электрохимической стадии в комбинированной обработке. В период развития электрохимической стадии происходит образование газового слоя на поверхности электродов. Подача высоковольтных импульсов в МЭЗ приводит к ионизации газа с формированием канала разряда, что может рассматриваться как запуск действия электроэрозионных процессов. При пробое изолирующего слоя вся подводимая энергия реализуется в канале разряда, поскольку его сопротивление на порядки ниже сопротивления электролита и парогазового слоя на электроде.

В данной работе на основе теоретических исследований показано количественное соотношение между режимными параметрами электрических импульсов электроэрозионным процессом и объемным эрозионным разрушением обрабатываемого материала в рамках комбинированной обработки при формообразовании отверстий диаметром менее 1 мм.

Описание теоретических исследований

Теоретическая оценка количественных соотношений между режимными параметрами электрических импульсов и объемом эрозионного разрушения обрабатываемого материала электроэрозионным процессом осуществлялась в комбинированной обработке, реализуемых в условиях экспериментальной установки, описанной в работе [15]. Экспериментальная установка включает источник импульсов высокого напряжения для реализации электроэрозионной составляющей, определяющий мощность подаваемых на ячейку импульсов схема, которого представлена на рисунке 1.

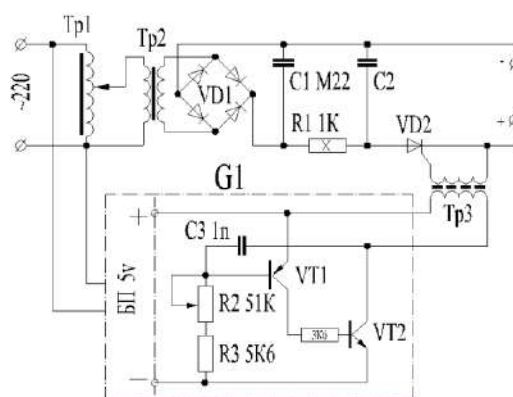


Рисунок 1 – Электрическая схема источника импульсов высокого напряжения для электроэрозионной составляющей [15]

Где

Tr1 – трансформатор ЛАТР;

Tr2 – разделительный повышающий трансформатор;

VD1 – мостовой выпрямитель;

C1 – фильтрующий конденсатор;

R1 – ограничительное сопротивление;

C2 – накопительно – разрядный конденсатор;

VD2 – тиристор;

G1 – задающий генератор открывающих тиристор импульсов;

Tr3 – трансформатор, обеспечивающий гальваническую развязку сетевого напряжения и нагрузки;

VT1 и VT2 – высокочастотные транзисторы;

Tr3 – импульсный трансформатор;

БП5v – стабилизированный блок питания на напряжение 5 В;

C3 – задающий генератор;

R2 – переменное сопротивление;

R3 – ограничительное сопротивление.

Результаты и обсуждение

Экспериментальная установка, подробно описанная в работе [15] была разработана с учетом необходимости обеспечения требований по точности и качеству обработки, в том числе при установлении параметров эрозионной составляющей в комбинированной обработке, представленной искровыми разрядами малой энергии и длительности, обусловленной особенностями технологической задачи по формообразованию отверстий малого диаметра.

Для установления количественных соотношений между режимными параметрами электрических импульсов и объемным эрозионным разрушением обрабатываемого материала воспользуемся эмпирическими зависимостями, полученными в работе [16] Б.И. Ставицким при экспериментальном изучении процессов электрической эрозии различных материалов, связывающих геометрические параметры лунки (диаметр, глубина, объем) от действия эрозионного разряда с энергией импульса (W_0):

$$D = k_D \times W_0^{1/3}, \text{ мкм}, \quad (1)$$

$$h = k_h \times W_0^{1/3}, \text{ мкм}, \quad (2)$$

$$V = k_\phi \times D^2 \times h \times 10^{-9}, \text{ мм}^3, \quad (3)$$

где

V, D, h – объем лунки, диаметр и глубина лунки на уровне исходной шероховатости, мкм;

k_D, k_h – коэффициенты, зависящие от материала электродов, параметров импульса, межэлектродного зазора (напряжения на электродах) и состава межэлектродной среды ($k_D = 3,6 - 5,7; k_h = 0,4 - 0,75$);

k_ϕ – коэффициент формы лунки ($k_\phi = 0,4 - 0,7$).

Преобразуя выражения (1 – 3), объем лунки V на обрабатываемой поверхности, сформированной единичным разрядом мощностью W_0^* , можно представить как:

$$V = k_\phi \times k_D^2 \times k_h \times W_0^* \times 10^{-9} = K_\varepsilon \times W_0^*, \text{ мм}^3, \quad (4)$$

где

K_ε – удельная эрозия, зависящая главным образом от материала электродов, длительности разряда, величины межэлектродного промежутка;

$W_0^* = 0,9 \times W_0$ – доля энергии импульса, затрачиваемая на эрозионное разрушение материала.

В работе [16] отмечено, что часть энергии импульса выделяется, в канале разряда увеличивается с увеличением межэлектродного расстояния. При межэлектродных промежутках от 0,05 до 0,1 мм рассеивание энергии в канале разряда достигает 10 %.

Из выражения (4) следует, что удельная эрозия (K_ε) определяется геометрическими параметрами сформированной лунки, а именно, пропорциональна коэффициентам формы (k_ϕ), глубины лунки (k_h) и квадрату коэффициента диаметра лунки (K_D):

$$K_\varepsilon = k_\phi \times k_h \times k_D^2 \times 10^{-9}, \text{ мм}^3/\text{мкДж}, \quad (5)$$

Экспериментальные данные по оценке параметров электрической эрозии, представленные в работе [16], соответствуют процессам на межэлектродных промежутках в диапазоне от 0,0075 до 0,028 мм и свидетельствует о значительном влиянии величины межэлектрод-

ного промежутка на значение удельной эрозии. Так, например, при энергии импульса $W_0 = 1500$ мкДж увеличение межэлектродного промежутка от 0,01 мм до 0,018 мм снижает значение удельной эрозии в 2,5 раза с $5,46 \times 10^{-9}$ мм³/мкДж до $2,17 \times 10^{-9}$ мм³/мкДж рисунок 2,а.

Комбинированная электроэрозионно-электрохимическая обработка реализуется на значениях МЭЗ (0,05 – 0,08 мм), обусловленных условиями реализации электрохимической размерной обработки (ЭХРО). Экстраполирование зависимости, представленной на рисунке 2,а, в область отмеченных значений МЭЗ позволяет прогнозировать снижение удельной эрозии до значений $K_3 = (0,75 – 0,9) \times 10^{-9}$ мм³/мкДж рисунок 2,б [17].

На основании изложенных положений и принятых допущений, возможно, провести количественную оценку технологических параметров электроэрозионной составляющей в комбинированной обработке.

Принимая во внимание технические характеристики источника импульсов высокого напряжения в экспериментальной установке, представленные в работе [15], можно утверждать, что параметры эрозионного импульса в комбинированной обработке определяются накопительно – разрядной ёмкостью.

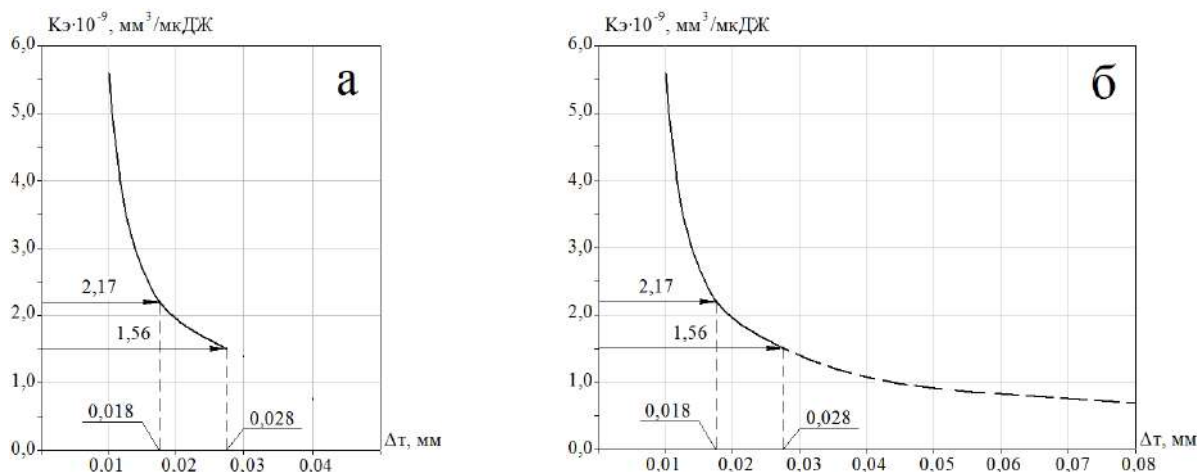


Рисунок 2 – Экстраполяция зависимости удельной эрозии в области исследуемых межэлектродных промежутков

В работе [17] показано, что конструкция источника импульсов высокого напряжения позволяет устанавливать значения накопительно – разрядной ёмкости в диапазоне от 10 нФ до 147 нФ с регулировкой напряжения в импульсе до 400 В.

Авторы работы [17] рекомендуют для электроэрозионной составляющей в комбинированной электроэрозионно-электрохимической обработке использовать рабочий диапазон напряжений от 100 В до 400 В. Следует отметить, что с повышением напряжения на электродах в МЭЗ снижает точность обработки. При напряжениях ниже 100 В обработка становится затруднительной из-за ухудшения условий удаления продуктов эрозии [18]. Учитывая отмеченные ограничения в данной работе было установлено значение импульсного напряжения равное 250 В, которое также рекомендуют и авторы работы [18], в которой отмечают, что обработка металлов импульсами тока производится при сравнительно невысоких напряжениях, обычно не превышающих 250 В.

В месте действия импульса электрической энергии на поверхности электродов остаются небольшие углубления – лунки, образовавшиеся вследствие удаления разрядом некоторого количества металла. Эффект эрозии, то есть количество материала, удаленного единич-

ным импульсом, и форма лунки зависит в первую очередь от энергии разрядного импульса [18].

Установление количественных соотношений между режимными параметрами электрических импульсов и объемным эрозионным разрушением обрабатываемого материала в данной работе проводилось для отделочных режимов электроэрозионной обработки, которые характеризуются небольшим МЭЗ. Расчеты проводились для значений накопительно – разрядных ёмкостей 10 нФ, 22 нФ, 47 нФ, 100 нФ, 147 нФ. При установленных ёмкостях 10 нФ, 22 нФ, 47 нФ, 100 нФ, 147 нФ и напряжении $U_{ИМП} = 250$ В энергия разрядного импульса может быть определена по формуле [19]:

$$W_0 = \frac{C \times U_{ИМП}^2}{2} \quad (6)$$

В таблице 1 приведены результаты расчетов значений энергии разрядных импульсов и их доли, реализуемой в лунке на обрабатываемой поверхности для значений ёмкостей в диапазоне от 10 нФ до 147 нФ.

Таблица 1 – Значения энергии разрядных импульсов и их доли, реализуемой в лунке на обрабатываемой поверхности

Ёмкость накопительно-разрядного конденсатора, нФ	Импульсное напряжение, В	Энергия разрядного импульса, мкДж	Доля энергии импульса, реализуемая в лунке на обрабатываемой поверхности, мкДж
10	250	$0,31 \times 10^3$	$0,28 \times 10^3$
22		$0,68 \times 10^3$	$0,61 \times 10^3$
47		$1,47 \times 10^3$	$1,32 \times 10^3$
100		$3,12 \times 10^3$	$2,81 \times 10^3$
147		$4,59 \times 10^3$	$4,13 \times 10^3$

В таблице 2 приведены результаты расчетов объема лунки от единичного разряда при значении удельной эрозии $K_Э = 0,85 \times 10^{-9}$ мм³/мкДж (рис. 2.б), соответствующей межэлектродному промежутку $\Delta_T = 0,07$ мм для значений ёмкостей в диапазоне от 10 нФ до 147 нФ.

Таблица 2 – Объем лунки от единичного разряда ($K_Э = 0,85 \times 10^{-9}$ мм³/мкДж, $\Delta_T = 0,07$ мм)

Ёмкость накопительно-разрядного конденсатора, нФ	Доля энергии импульса, реализуемая в лунке на обрабатываемой поверхности, мкДж	Объем лунки от единичного разряда, мм ³
10	$0,28 \times 10^3$	$0,24 \times 10^{-6}$
22	$0,61 \times 10^3$	$0,52 \times 10^{-6}$
47	$1,32 \times 10^3$	$1,12 \times 10^{-6}$
100	$2,81 \times 10^3$	$2,39 \times 10^{-6}$
147	$4,13 \times 10^3$	$3,51 \times 10^{-6}$

Управление периодом следования разрядных импульсов в обработке осуществляется задающим генератором G1 рисунок 1. При установленной в работе [17] частоте следования f

= 25 кГц суммарный объем удаленного эрозией материала за 1 минуту при установленных ёмкостях составит, таблица 3.

Таблица 3 – Суммарный объём удаленного эрозией материала

Ёмкость накопительно-разрядного конденсатора, нФ	Объём лунки от единичного разряда, мм ³	Суммарный объём удаленного эрозией материала за 1 минуту, мм ³ /мин
10	$0,24 \times 10^{-6}$	0,36
22	$0,52 \times 10^{-6}$	0,78
47	$1,12 \times 10^{-6}$	1,68
100	$2,39 \times 10^{-6}$	3,58
147	$3,51 \times 10^{-6}$	5,26

На рисунке 3 показан график зависимости суммарного объёма удаленного эрозией материала за 1 минуту от ёмкости накопительно-разрядного конденсатора, из которого видно, что при увеличении ёмкости накопительно-разрядного конденсатора возрастает объём удаленного эрозией материала.

Из работы [16] известно, что отношение диаметра лунки к её глубине увеличивается с возрастанием длительности импульса тока, что объясняется расширением канала разряда. При одной и той же энергии импульсов, но меньшей длительности образуются более глубокие лунки менее расплывчатой формы.

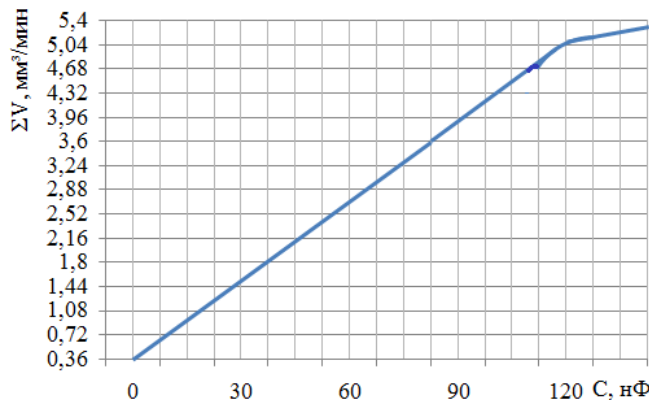


Рисунок 3 – График зависимости суммарного объёма удаленного эрозией материала за 1 минуту от ёмкости накопительно-разрядного конденсатора

На рисунке 4 представлены формы импульсов высокого напряжения при различных значениях ёмкости накопительно-разрядного конденсатора [17], из которого видно, что при увеличении ёмкости накопительно-разрядного конденсатора затрачивается большая энергия для получения необходимой геометрии отверстия. При этом длительность импульса возрастает. Поэтому для сохранения геометрии лунки необходимо снижать не только энергию импульса, но и длительность импульса.

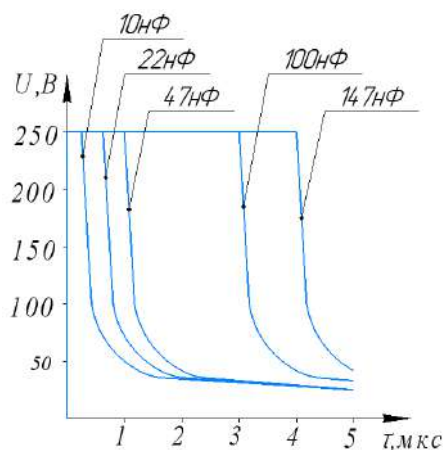


Рисунок 4 – Формы импульсов высокого напряжения при различных значениях ёмкости накопительно-разрядного конденсатора

Таким образом, можно сказать, что наибольший эффект эрозии получается при определенном соотношении энергии и длительности импульсов. С одной стороны, чем короче разряд во времени, тем большая энергия сконцентрирована в объеме разряда. С другой стороны, передача тепла внутри металла благодаря теплопроводности требует некоторого времени.

По результатам экспериментов, проведенных авторами в работе [17] показано, что при использовании в комбинированной обработке таких параметров как ёмкость накопительно-разрядного конденсатора 47 нФ, длительность импульсов 4 мкс, частота следования импульсов 25 кГц разброс диаметральных размеров при обработке отверстий диаметром менее 1 мм не превышает 0,02 мм. Шероховатость поверхности составляет $Ra = 0,5$ мкм. В соответствии с ГОСТ 25346 – 89 для размеров до 3 мм такие значения соответствуют величине допуска по 9 качеству. Поскольку глубокие отверстия малого диаметра, как правило, представляют собой каналы смазки, подачи различных жидкостей, охлаждения, то достигнутая точность и качество поверхности отверстия вполне удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым для формообразования отверстий малого диаметра. В связи с этим авторы работы [17] рекомендуют в комбинированной электроэрозионно-электрохимической обработке для формообразования глубоких отверстий малого диаметра, а также их точности и производительности использовать отделочные режимы электроэрозионного процесса.

Выводы

Проведена количественная оценка технологических параметров электроэрозионного процесса в комбинированной обработке. Анализ представленных теоретических результатов свидетельствует о значительном влиянии величины межэлектродного промежутка на значение удельной эрозии. Показано, что увеличение значений межэлектродного промежутка от 0,05 мм до 0,08 мм, реализуемых в комбинированной обработке, снижает значение удельной эрозии в 1,2 раза с $0,9 \times 10^{-9}$ мм³/мкДж до $0,75 \times 10^{-9}$ мм³/мкДж. Показано, что с увеличением ёмкости накопительно-разрядного конденсатора, увеличивается объем удаленного эрозией материала.

Список литературы

1. Такунцев К.В. Электроэрозионно – электрохимическая обработка: современное состояние, проблемы, перспективы / К.В. Такунцев, А.Н. Зайцев // Перспективные

технологии физико – химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Уфа. – 2001. – С. 9 – 13.

2. Смоленцев В.П. Состояние и перспективы развития комбинированных методов обработки / В.П. Смоленцев, Е.В. Смоленцев // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. - 2017. - № 2 (41). – С. 5 – 9.

3. Саушкин Б.П. Электрический разряд в жидких и газовых средах – основа нового поколения методов и технологий машиностроительного производства // Электронная обработка материалов. 2004. № 1. – С. 4 – 17.

4. Мороз И.И. Технология и оборудование для электроэрозионно – химической обработки / И.И. Мороз, Р.Б. Исакова. М. 1985.

5. Зайцев А.Н. Электроэрозионно – химическая прошивка отверстий малого диаметра в деталях из высокопрочных сталей и сплавов / А.Н.Зайцев. М. 1991.

6. Amalnik S.M. An intelligent knowledge- based system for wire-electro-erosion dissolution in a concurrent engineering enviroment / S.M. Amalnik, H.A. El-Hofy, J.A. McGeough // Journal of Materials Processing Technology. 1998. – 79. P. 155 – 162.

7. Crichton J.N. Studies of the Discharge in Electrochemical act Machining / J.N. Crichton, J.A. McGeough // J. Applied Electrochem. 1985. – Vol.15. № 1. P. 113 – 119.

8. Kim D.J. Voltage pulse frequency and duty ratio effects in an electrochemical discharge microdrilling process of Pyrex glass / D.J. Kim, Y. Ahn, S.H. Lee, Y.K. Kim // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2006. – 46. P. 1064 – 1647.

9. Kobayashi F. Electrochemical discharge drilling methode / F. Kobayashi. Pantent JP9234629. 1997.

10. Nguyen M.D. Simultaneous micro-EDM and micro-ECM in low-resistivity deionized water / M.D. Nguyen, M. Rahman, Y.S. Wong. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012. – 54 – 55(0). P. 55 – 65.

11. Nguyen M.D. Enhanced surface integrity and dimensional accuracy by simultaneous micro-ED/EC milling / M.D. Nguyen, M. Rahman, Y.S. Wong. // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2012. – 61(1). P. 191 – 194.

12. Rakhimyanov Kh. M. Activation of Electrochemical Piercing of Small Diameter Holes by Implementing High-Voltage Pulses in the Inter-Electrode Gap / Kh. M. Rakhimyanov, S.I. Vasilevskaya // Matec Web of Conferences, 2019. – Vol. 297: X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME 2019) . - Art. 01008 (7 p.).

13. Rakhimyanov Kh. M. Prospects of combining electro-erosive and electrochemical processes in forming the holes of a small diameter in difficult – to – process materials / Kh. M. Rakhimyanov, S. I. Vasilevskaya // Matec Web of Conferences. 2018. – Vol. 224: International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment (ICMTMTE 2018). – Art. 01013 (7p.).

14. Vasilevskaya S.I. Consideration of hydraulic limitations in setting the mode parameters of combined piercing the holes / S.I. Vasilevskaya // Matec Web of Conferences, 2019, Vol. 298. International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment (ICMTMTE 2019). – Art. 00141 (6 p.).

15. Rakhimyanov Kh. M. Providing the forming accuracy during the electrochemical deep hole drilling of a small diameter by the cathode – tool with a complete electro – isolating coating / Kh. M. Rakhimyanov, S. I. Vasilevskaya, K. Kh. Rakhimyanov // XIV International scientific-technical conference «Actual problems of electronic instrument engineering» (APEIE – 2018). 2018, Vol.1, no. 3, pp. 151 – 154.

16. Ставицкий Б.И. Электроискровая прецизионная обработка материалов. Научные основы особо точных методов формообразования поверхностей / Б.И. Ставицкий // Электронная обработка материалов. – 2002. - № 1. – С. 5 – 32.

17. Василевская С.И. Формообразование глубоких отверстий малого диаметра при электроэрозионной – электрохимической прошивке: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. – Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, 2020 - 195 с.

18. Левинсон Е.М. Отверстия малых размеров (методы получения). Л.: Машиностроение. 1977. – 151 с.

19. Трофимова Т.И. Справочник по физике / Т.И. Трофимова, издательство Астрель, 2001 – 399 с.: ил.

DETERMINATION OF THE QUANTITATIVE CORRELATIONS BETWEEN THE MODE PARAMETERS OF THE ELECTRIC PULSES AND THE EROSION DESTRUCTION OF THE PROCESSED MATERIAL BY THE ELECTRO-EROSIVE COMPONENT IN THE COMBINED MACHINING DURING PIERCING THE HOLES OF SMALL DIAMETER

Vasilevskaya S.I., Senior Lecturer, vasilevskaya@corp.nstu.ru

Nikitin Yu.V. Ph.D., associate professor, nikitin@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, Faculty of Mechanical Engineering and Technologies, 630073 Prospect K. Marx, 20, Novosibirsk, Russia

Abstract

The introduction of modern electro-physical methods of forming the surfaces of small geometrical dimensions in difficult-to-process materials allows us to use new technical solutions to constructing objects of different types. The perspective method is considered to be combining the processes of different physical nature in one machining. Therefore, the use of electro-erosive – electrochemical processing is suggested for piercing the holes of small diameter. The paper considered presents the quantitative estimation of correlation between the mode parameters of the electric pulses and the erosive destruction of the processed material by the electro-erosive process in the combined machining during piercing the holes with a diameter of less than 1 mm. The paper shows that the value of the inter-electrode gap magnitude considerably influences the value of the specific erosion. It is also shown that the value of the storage-discharge condenser is limited by the value of the breakthrough voltage on the electrodes, which is necessary to obtain the discharge channel. It is pointed out that it is necessary to use the finishing modes of the electro-erosive process for forming the deep holes of small diameter in the combined electro-erosive – electrochemical machining.

Keywords: combined machining, quantitative estimation, pulse voltage, forming the holes of small diameter, cathode-tool, pulse duration, high voltage stress strain, pulse repetition period.

УДК 621.91.02

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕТОДИКИ ВЫБОРА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ТВЕРДОГО СПЛАВА И РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

*ВАСИЛЕГА Дмитрий Сергеевич, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: d_vasilega@mail.ru*

*ВАСИЛЬЕВ Дмитрий Вячеславович, кандидат техн. наук,
e-mail: vasilevdv@tyuiu.ru*

*ВАСИЛЕГА Наталья Александровна, аспирант,
e-mail: vasilegana@tyuiu.ru*

Тюменский индустриальный университет, 625000, Российская Федерация, г. Тюмень,
ул. Володарского, 38

Аннотация

В работе приведены результаты определения оптимальных режимов обработки жаропрочной высоколегированной стали 10X11H23T3MP концевыми твердосплавными фрезами с использованием методики выбора инструментального твердого сплава и режимов резания, основанной на способах определения температуры максимальной обрабатываемости материала и температуры максимальной работоспособности инструментального твердого сплава. С целью проверки найденной оптимальной скорости резания экспериментально определена зависимость износа инструмента от скорости резания. Получена экспериментально зависимость износа исследуемых фрез при обработке стали 10X11H23T3MP от угла наклона винтовых канавок.

Ключевые слова: работоспособность, инструментальный твердый сплав, концевая фреза, режимы резания.

Введение

Правильный выбор условий обработки (скорость резания, подача и глубина резания и геометрия режущего инструмента сильно влияют на производительность обработки [1]. Неправильно подобранные параметры обработки и плохо спроектированный режущий инструмент не только ухудшают качество поверхности, но также увеличивает силы резания, влияя на стабильность и вызывая термическую деформацию из-за повышения температуры в зоне резания и быстрого износа инструмента.

Работоспособность представляет из себя наиболее важный показатель эффективности эксплуатации металлорежущего инструмента. Как установлено в работах [2,3] определяющее влияние на работоспособность инструментов (особенно с режущей частью из инструментальных твердых сплавов) оказывают физические и механические характеристики инструментальных материалов.

Исследованию подвергалась жаропрочная высоколегированная сталь 10X11H23T3MP. Химический состав представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав жаропрочной высоколегированной стали 10X11H23T3MP

Массовая доля элементов, %										
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti	Al	B
≤0.10	≤0.60	≤0.60	≤0.01	≤0.025	10-12.5	21-25	1-1.6	2.6-3.2	≤0.80	≤0.02

В рамках этого исследования обработка проводилась четырёхзубой твердосплавной концевой фрезой диаметром 12 мм. В качестве инструментального материала использовался твердый сплав без покрытия.

Технические характеристики геометрии концевой фрезы, используемой для проведения экспериментов, следующие:

Количество зубьев 4

Диаметр фрезы 12 мм

Длина хвостовика 70 мм

Угол наклона винтовой канавки 30°, 35°, 40°, 45°.

Реализация методики

Методика выбора инструментального твердого сплава и режимов резания, применяемая в данном исследовании подробно описана в работах [4,5], способы определения температуры максимальной обрабатываемости материала и температуры максимальной работоспособности инструментального твердого сплава описаны в работах [6-7].

На первом этапе, как показано на рисунках 1 и 2, по экстремальным значениям зависимостей относительного удлинения δ и относительного сужения ψ от температуры определена температура максимальной обрабатываемости жаропрочной высоколегированной стали 10X11H23T3MP. Температура максимальной обрабатываемости стали 10X11H23T3MP, $\Theta_{\text{м.о.}}=750^{\circ}\text{C}$.

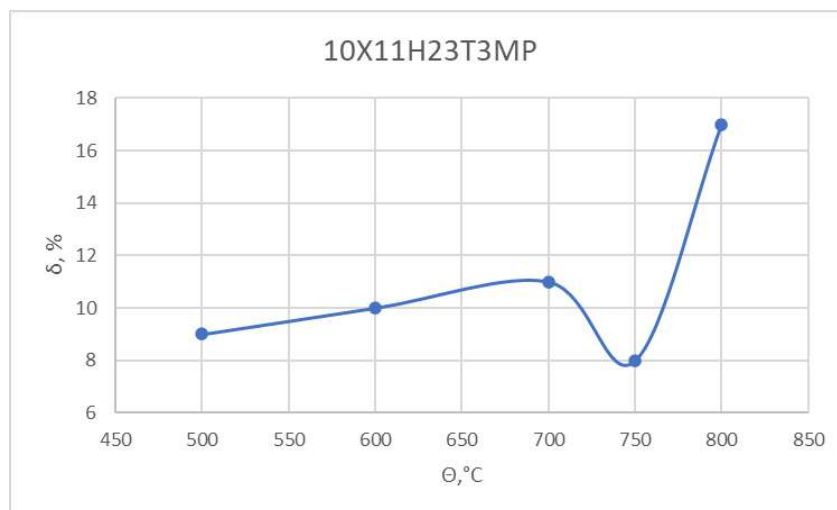


Рисунок 1 – Влияние температуры на относительное удлинение δ при механических испытаниях сплава 10X11H23T3MP

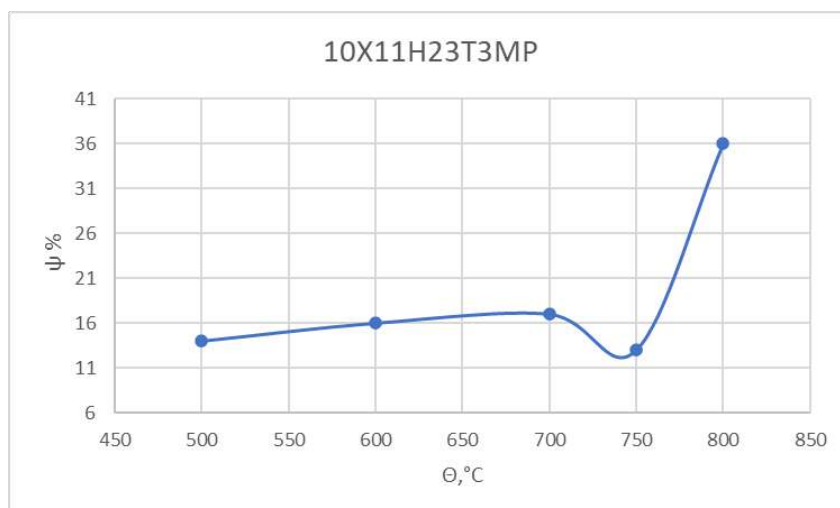


Рисунок 2 – Влияние температуры на относительное сужение ψ при механических испытаниях сплава 10X11H23T3MP

Следующим этапом определяются температуры максимальной работоспособности у потенциальных инструментальных твердых сплавов и выбирается тот материал, температура максимальной работоспособности которого совпадает или наиболее близка к температуре максимальной обрабатываемости стали 10X11H23T3MP. Были рассмотрены однокарбидные твердые сплавы ВК6, ВК8, ВК15 и двухкарбидный твердый сплав Т15К6. Сплав ВК8, обладает наиболее близкой температурой максимальной работоспособности, которая составляет $\Theta_{\text{м.р.}}=750^{\circ}\text{C}$.

Самым сложным этапом является установление по определенной ранее температуре максимальной обрабатываемости ($\Theta \text{ м.о.} = 750^{\circ}\text{C}$) и установленной экспериментально зависимости температуры от скорости резания, представленной на рисунке 3, оптимальной скорости резания (V_0) обеспечивающей максимальную работоспособность инструмента, а следовательно и минимальный износ.

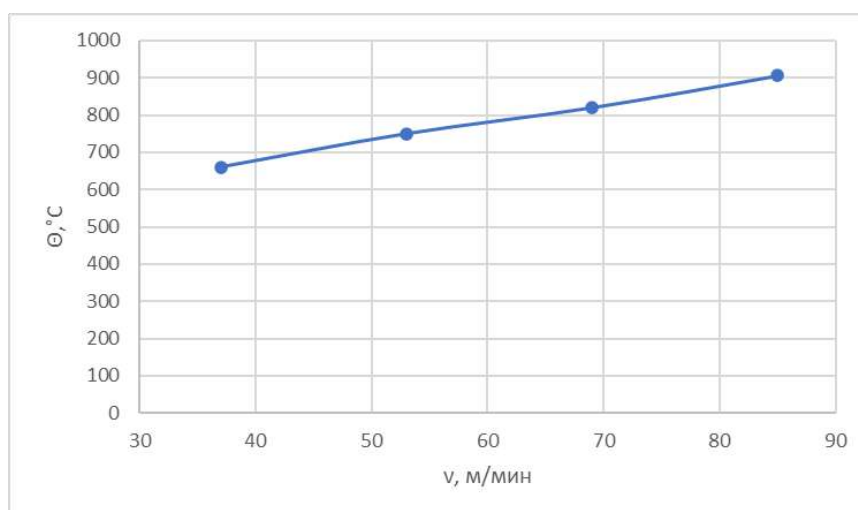


Рисунок 3 – Зависимость температуры от скорости резания при обработке (10X11H23T3MP, ВК8)

С целью проверки найденной оптимальной скорости резания бала проведена обработка стали 10X11H23T3MP твердосплавными концевыми фрезами при различных скоростях резания и установлена зависимость износа инструмента от скорости резания представленная на рисунке 4.

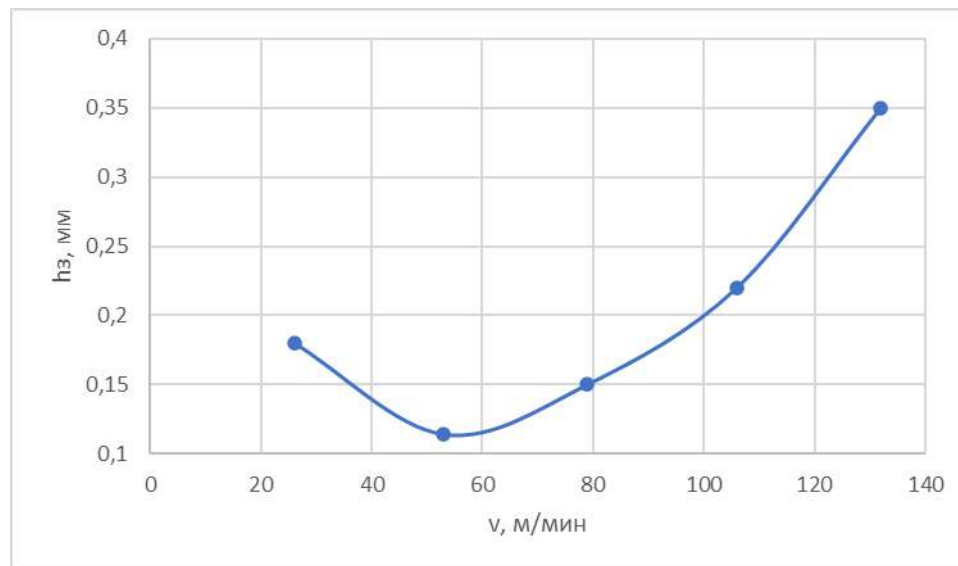


Рисунок 4 – Влияние скорости резания на износ инструмента (угол наклона винтовой канавки 40° , $S_o = 0.09$ мм/об, $t = 0.6$ мм.)

Согласно полученной зависимости, увеличение скорости резания с 26 м/мин до 53 м/мин сводит к минимуму износ инструмента, а дальнейшее увеличение скорости резания с 53 м/мин до 132 м/мин приводит к резкому увеличению износа инструмента. Можно предположить, что увеличение скорости резания ускоряет термически активируемые механизмы износа. Это приводит к более интенсивному механическому воздействию на инструмент. В результате увеличивается градиент температуры, что приводит к увеличению износа инструмента. По зависимости видно, что износ инструмента является оптимальным при скорости резания 53 м/мин. Что соответствует оптимальной скорости резания полученной с помощью методики выбора инструментального твердого сплава и режимов резания, не требующей проведения большого количества стойкостных испытаний.

Дополнительно было изучено влияние угла наклона винтовой канавки на износ инструмента. Зависимость износа инструмента от угла наклона винтовой канавки полученная в результате эксперимента представлена на рисунке 5.

По зависимости видно, что увеличение угла наклона винтовой канавки с 30° до 40° приводит к снижению износа инструмента. Это связано с повышением плавности фрезерования, что снижает вибрацию. Кроме того было обнаружено, что с увеличением угла наклона винтовой канавки с 40° до 45° износ инструмента увеличивается. Это может быть связано с ослаблением зубьев при большем угле наклона спирали, что приводит к повышенному износу инструмента. Согласно полученной зависимости износ инструмента является оптимальным, когда угол наклона спирали составляет около 40° .

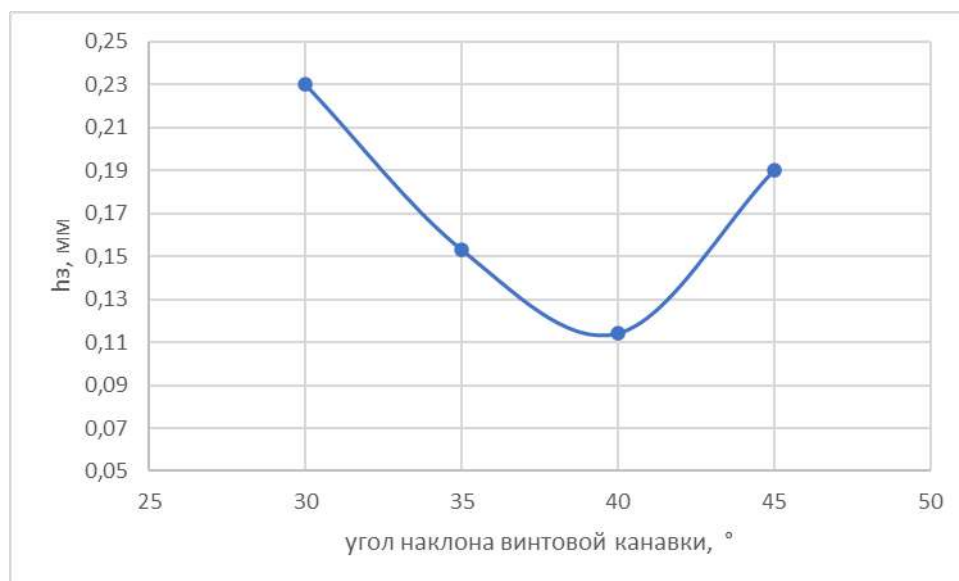


Рисунок 5 – Влияние угла наклона винтовой канавки на износ инструмента

Выводы

Таким образом, в результате исследования для обработки твердосплавными концевыми фрезами жаропрочной высоколегированной стали 10X11H23T3MP, с использованием методики выбора инструментального твердого сплава и режимов резания, выбран инструментальный твердый сплав и оптимальная скорость резания. Полученная экспериментально зависимость износа инструмента от скорости резания подтвердила правильность определения оптимальной скорости резания по указанной методике. Применение указанной методики позволило избежать продолжительных стойкостных испытаний. Дополнительно проверена оптимальность угла наклона винтовой канавки.

Список литературы

1. Anirban Bhattacharya, Santanu Das, Majumder, P & Ajay surface finish and power consumption during high speed machining of AISI 1045 steel using Taguchi design and ANOVA Production Engineering. – vol. 3. – no. 1. – pp. 31-40.
2. Верещака, А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака // – М.: Машиностроение. – 1993. – 336 с. – Текст : непосредственный.
3. Артамонов, Е.В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов: Монография / Е.В. Артамонов // Тюмень: ТюмГНГУ. – 2003.– 192 с. – Текст : непосредственный.
4. Василега, Д.С. Оптимизация температурного режима резания с целью повышения работоспособности инструмента / Д.С. Василега // Главный механик. – 2010. – № 8. – С. 32-39. – Текст : непосредственный.
5. Патент на изобретение RU 2373028 С2. Способ выбора инструментального твердого сплава для обработки стали резанием : № 2008101014/02 : заявл. 09.01.2008 : опубл. 20.11.2009 / Артамонов Е.В., Кусков В.Н., Василега Д.С. – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.
6. Василега, Д.С. Определение температуры максимальной работоспособности инструментальных твердых сплавов в рамках методики оценивания качества применения сборных металлорежущих инструментов / Василега Д.С., Остапенко М.С., Василега Н.А., Ершов

В.В. // В сборнике: Нефть и газ Западной Сибири. Материалы Международной научно-технической конференции. – 2017. – С. 25-27. – Текст : непосредственный.

7. Vasilega, D.S. Analysis of possible application of temperature dependences of processed materials' physical and mechanical properties to define the maximum workability temperature / Vasilega D.S., Zyryanov V.A. // Key Engineering Materials. – 2017. – Т. 737. – С. 114-118.

8. Vasilega, D.S. Method for the determination of hard alloys' maximum performance temperature in the context of the metal-cutting tools' usage quality estimation technique / Vasilega D.S., Shtin A.S. // Key Engineering Materials. 2017. – Т. 737. – С. 59-63.

9. Василега, Д.С. О взаимосвязи коэффициента линейного теплового расширения с обрабатываемостью материалов / Василега Д.С., Тверяков А.М. // В сборнике: Новые технологии - нефтегазовому региону. Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 50-летию ТИИ-ТюмГНГУ. – 2013. – С. 131-133. – Текст : непосредственный.

10. Патент на изобретение RU 2373029 С2. Способ определения температуры максимальной работоспособности твердосплавных режущих пластин : № 2008101015/02 : заявл. 09.01.2008 : опубл. 20.11.2009 / Артамонов Е.В., Кусков В.Н., Василега Д.С. – 6 с. : ил. – Текст : непосредственный.

OPTIMIZATION OF PROCESSING CONDITIONS OF HARD-TO-PROCESS MATERIAL BASED ON THE METHOD OF SELECTING A TOOL HARD ALLOY AND CUTTING MODES

Vasilega D.S., PhD (Engineering), Associate professor, e-mail: vasilegads@tyuiu.ru

Vasilev D.V., PhD (Engineering), Associate professor, e-mail: vasilevdv@tyuiu.ru

Vasilega N.A., postgraduate, e-mail: vasilegana@tyuiu.ru

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education « Industrial University of Tyumen», 625000, Russia, Tyumen region, Tyumen, Volodarsky str., 38

Abstract

The paper presents the results of determining the optimal processing modes of heat-resistant high-alloy steel 10X11N23T3MR with end carbide cutters using the method of selecting a tool hard alloy and cutting modes based on methods for determining the temperature of the maximum workability of the material and the temperature of the maximum working capacity of the tool hard alloy. In order to verify the found optimal cutting speed, the dependence of tool wear on the cutting speed is experimentally determined. The dependence of the wear of the studied milling cutters during the processing of 10X11N23T3MR steel on the angle of inclination of the screw grooves is obtained experimentally.

Keywords: working capacity, tool hard alloy, end mill, cutting modes.

УДК 621

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

*ТВЕРЯКОВ Андрей Михайлович¹, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: tveryakov@mail.ru*
*ОСТАПЕНКО Мария Сергеевна¹, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: ms_ostapenko@mail.ru*
*ШТИН Антон Сергеевич¹, кандидат техн. наук,
e-mail: shtin_as@mail.ru*

Тюменский индустриальный университет, 625000, Российская Федерация, г. Тюмень,
ул. Володарского, 38

Аннотация

Рассмотрена роль цифровых элементов на этапах жизненного цикла машиностроительной продукции на качество. Проведен анализ существующих программных средств определения рациональных режимов обработки. Представлен подход для назначения рациональных режимов обработки, учитывающий состояние инструментального и обрабатываемого материалов, который обеспечит повышение качества производимой продукции.

Ключевые слова: цифровизация, машиностроение, режимы обработки.

Введение

Современное представление о качестве, системах качества зародилось благодаря технической продукции в том числе и машиностроительной. Как известно – качество закладывается на всех этапах жизненного цикла продукции, но ошибка, допущенная на ранних стадиях гораздо затратнее для компании. Т.е. чем выше уровень совершения ошибки, тем выше затраты на ее исправление.

На качество машиностроительной продукции влияет как уровень брака, так и значения показателей продукции или ее технический уровень [10].

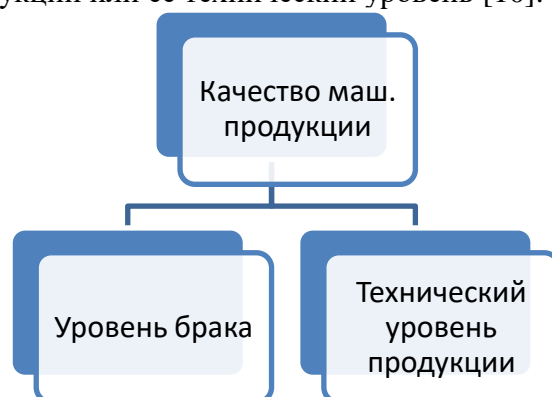


Рисунок 1 – Схема качества машиностроительной продукции

Цифровизация влияет на оба составляющие качества машиностроительной продукции. В производственных процессах в основном на величину (уровень) брака и производительность. А на технический уровень, за счет применения в структуре объекта производства.

Описание теоритических исследований

Присутствие элементов цифровизации на этапах проектирования, организации производства подробно изложены в материалах [9].

В данной публикации рассмотрим влияние цифровизации на процессы создания изделий машиностроения, на затраты времени и ресурсов. Т.е. повышение качества минимизацией несоответствий в назначении режимных условий (брака) и сокращение затрат (сокращение себестоимости).

Ввиду сложности процесса резания, на назначение режимных условий влияет множество факторов: легирующие элементы обрабатываемого материала, термообработка, несовершенство формы, зернистость и состав инструментальных материалов. Совместимость и взаимное влияние и инструментального и обрабатываемого материала.

Стандартные решения (предложения инструментальных фирм, программ проектирования и т.д.) работают только на хорошо изученных материалах.

Существуют программные продукты для назначения режимов обработки объединяющей и информацию ведущих инструментальных фирм по различным группам обрабатываемости материалам для нужд конкретной организации [11]. Т.е. своеобразный агрегатор объединяющий базы данных инструментальных фирм используемых на предприятии.

Многофакторное влияние параметров процесса резания (обработки) используется во многих программах. Успех этих подходов зависит от совпадения учитываемых факторов и свойств материалов, применяемых в обработке.

Существуют способы назначения режимных условий на основе оценки значимости критериев влияющих на процесс обработки. [7] . С одной стороны, можно сказать что данный способ решает проблему назначения режимов резания, т.к. параметры, имеющие наибольшее влияние на процесс должны быть использованы для назначения. С другой стороны, ошибки в оценке значимости параметров и не до оценки других параметров может привести к не правильным решениям.

С одной стороны, чем больше факторов учитывает программа, тем точнее результата назначения. С другой стороны точность определения влияния каждого фактора будет влиять на результат расчета, т.е. чем больше параметров, тем вероятность ошибки выше.

В результате получается ситуация что в предлагаемых условиях за счет информационных технологий задача решается, но стоит поменять один или несколько факторов, уже работают другие алгоритмы и предлагаемое решение теряет свою актуальность.

Результаты и их обсуждение

По нашему мнению, что подтверждает и литературный обзор, основным фактором, влияющим на состояние материалов и режимные условия, влияет температура [8]. Т.к. под действием температуры свойства меняются, и это является индикатором для управления режимом обработки.

Зная, как влияет температура на параметры процесса обработки и на характеристики обрабатываемого и инструментального материала. Можно подбирать оптимальное сочетание, когда инструментальный материал обеспечивает максимальную работоспособность, а обрабатываемый материал максимальную обрабатываемость.

Существует ряд работ по определению температуры максимальной работоспособности по изменению физико-механическим характеристикам.[1, 2, 4, 5, 8]. Т.к. результаты при-

веденных исследований обладают хорошей корреляцией, каждая из методик может быть использована для создания программы определения температур максимальной работоспособности инструментального материала. Для этих целей была выбрана методика на основе изменения электрической проводимости инструментальных твердых сплавов (ИТС).

В результате была создана программа, которая позволяет обработать результаты экспериментальных исследований изменения электрической проводимости образцов из инструментального материала, определить диапазон температур максимальной работоспособности (Рис.2).

В работах [3, 6] представлены методики позволяющие определить условия при которых обрабатываемый материал позволяет с минимальными затратами энергии поддаваться обработке. Эти данные могут быть использованы для подбора оптимального сочетания инструментального и обрабатываемого материала.

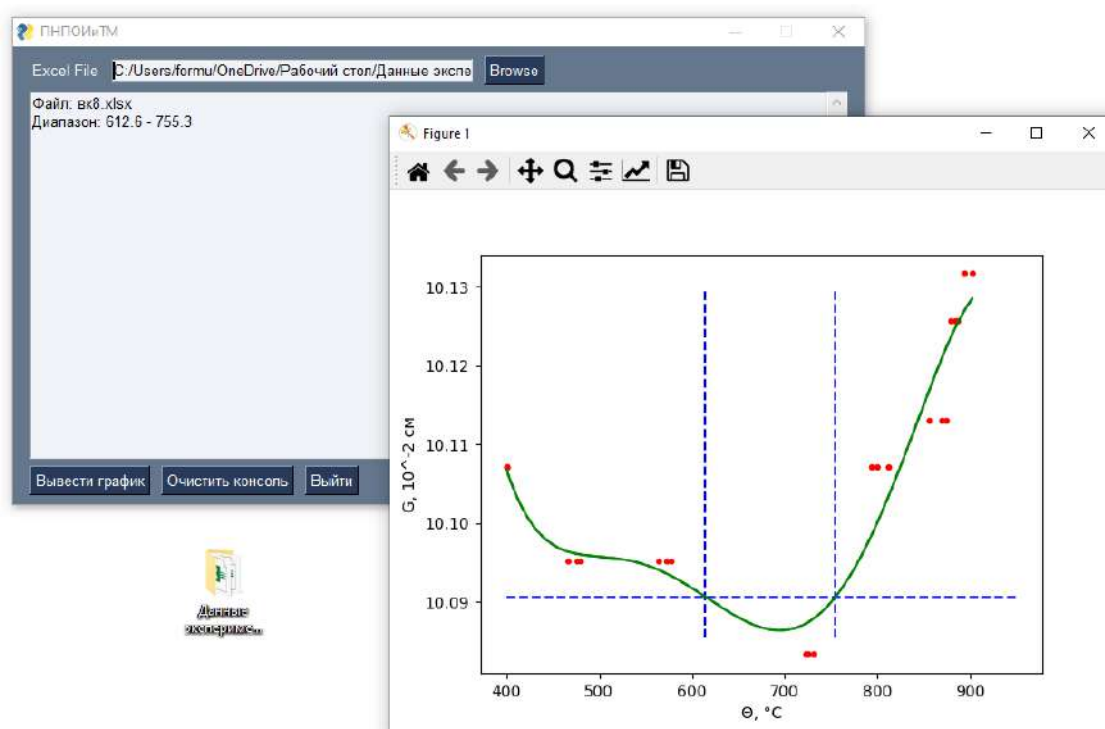


Рисунок 2 – Окно программы определения диапазона температур максимальной работоспособности ИТС

Выводы

Таким образом, зная значения диапазона температур максимальной работоспособности и зная значения температуры максимальной обрабатываемости, можно подобрать оптимальное сочетание. На основе этих данных назначаются технологические режимы обработки для конкретной операции. Данный подход позволит минимизировать количество ошибок назначения режимов обработки, как следствие сокращение уровня брака, что в свою очередь повысит уровень качества.

Список литературы

1. Пат. 2173611 . Российская Федерация, МПК В23В 1/00. Способ определения оптимальной скорости резания твердосплавными инструментами/ Е.В. Артамонов, В.Н.

Кусков, Т.Е. Помигалова, В.М. Костив; заявитель и патентообладатель Тюменский государственный нефтегазовый университет. – № 99121439/02; заявл. 12.10.1999; опубл. 20.09.2001, Бюл. № 26

2. Пат. 2215615 . Российская Федерация, МПК В23В 1/00. Способ определения оптимальной скорости резания твердосплавными инструментами / Е.В. Артамонов, В.Н. Кусков, Т.Е. Помигалова, В.М. Костив; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тюменский государственный нефтегазовый университет". – № 2001135677/02; заявл. 24.12.2001; опубл. 10.11.2003, Бюл. № 31.

3. Артамонов Е. В. [и др.]. Формирование условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов на основе высокотемпературного охрупчивания при резании: монография / Е. В. Артамонов, Д. С. Василега, Д. В. Васильев, М. Х. Утешев, Тюменский индустриальный университет, 2016, С. 162.

4. Пат. 2373029 . Российская Федерация, МПК В23В 1/00. Способ определения температуры максимальной работоспособности твердосплавных режущих пластин/ Е.В. Артамонов, В.Н. Кусков, Д.С. Василега; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тюменский государственный нефтегазовый университет". – № 2008101015/02; заявл. 09.01.2008; опубл. 20.11.2009, Бюл. № 32.

5. Пат. 2682196 . Российская Федерация, МПК В23В 1/00. Способ определения оптимальной скорости резания твердосплавными инструментами/ Е.В. Артамонов, А.М. Тверяков, А.С. Штин; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тюменский индустриальный университет" (ТИУ). – № 2018100446; заявл. 09.01.2018; опубл. 15.03.2019, Бюл. № 8

6. Василега Д. С., Тверяков А. М. О взаимосвязи коэффициента линейного теплового расширения с обрабатываемостью материалов// Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Новые технологии-нефтегазовому региону, посвященной 50-летию ТИИ-ТюмГНГУ. 2013.С. 131–133.

7. Рычков Д. А., Лобанов Д. В., Смирнова Д. А. Методика оптимизации режимов резания в интеллектуальной системе проектирования технологических процессов // Современные материалы, техника и технологии. 2018. № 4 (19).

8. Тверяков А. М. Определение температуры максимальной работоспособности сменных твердосплавных пластин для повышения эффективности обработки сборным инструментом: специальность 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тверяков Андрей Михайлович ; Тюменский государственный нефтегазовый университет. - Тюмень, 2013. - 146 с.

9. Тверяков А. М. Цифровизация в машиностроении // сборник трудов Международной научно-технической конференции «Машиностроительные технологические системы». 2021. С. 186–188.

10. ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения (с Изменением N 1) от 26 января 1979 - docs.cntd.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200001719> (дата обращения: 10.09.2021).

11. ПрЭВМ 2019618093 Российская Федерация. Моделирование режимов резания для разных групп обрабатываемого материала. / И.К. Будникова, В.Л. Герасимов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»). – № 2019615514; заявл. 17.05.2019; опубл. 26.06.2019.

DIGITALIZATION FOR IMPROVING THE QUALITY OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS

Tveryakov A.M., C. Sc. (Engineering), Associate Professor, e – mail: tveryakov@mail.ru,
Ostapenko M.S., C. Sc. (Engineering), Associate Professor, e – mail: ms_ostapenko@mail.ru
Shtin A.S., C. Sc. (Engineering), e – mail: shtin_as@mail.ru.

Tyumen Industrial University, 38 Volodarsky str., Tyumen, 625000, Russian Federation

Abstract

The role of digital elements at the stages of the life cycle of machine-building products in terms of quality is considered. The analysis of existing software tools for determining rational processing modes is carried out. An approach to the appointment of rational processing modes is presented, taking into account the condition of the tool and the processed materials, which will ensure an increase in the quality of the products.

Keywords: digitalization, mechanical engineering, processing modes.

УДК 621.9.047

СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ И КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

*СМОЛЕНЦЕВ Владислав Павлович докт.техн.наук, профессор,
e-mail: vsmolen@inbox.ru*

Воронежский государственный технический университет, 394026, Российская Федерация,
г. Воронеж, Московский пр.14

Аннотация

В материалах приведен анализ состояния и перспективы развития электрических методов обработки в стране и за рубежом. В основу исследования положен опыт использования новых процессов в авиакосмической отрасли машиностроения.

Ключевые слова: Методы обработки. Комбинация воздействий. Область применения Машиностроение

Введение

Электрические методы обработки являются значимой частью технологии механической обработки деталей [1;2]. Они наиболее востребованы в наукоемких отраслях машиностроения [3]. Доля электрических методов в общей трудоемкости изготовления, сборки и испытания авиакосмической техники не превышает нескольких процентов, но выполняемые этими методами операции позволяют решить проблему создания новых поколений техники, обладающей мировой новизной.

Классификация электрических методов обработки

Электрофизические, электрохимические и комбинированные (далее электрические) виды обработки включают МЕТОДЫ:

- электроэрозионные;
- электрохимическую размерную обработку;
- ультразвуковые;
- лучевые методы;
- импульсную с воздействием электромагнитного поля;
- КОМБИНИРОВАННЫЕ.

Наиболее перспективными являются комбинированные методы обработки с использованием, в основном, наложения электрического поля.

Часть электрических методов обработки (ЭМО) была открыта и запатентована в нашей стране. Автором основополагающего электроэрозионного процесса является академик Молдавской академии наук, доктор технических наук, профессор Б.Р. Лазаренко, электрохимическую размерную обработку предложили ленинградские специалисты В.Н. Гусев и Л.А. Рожков. Большой вклад в исследование комбинированных методов обработки внесли ученые Москвы, С.Петербурга, Казани, Тулы, Воронежа, Самары, Кишинева, Новосибирска, Братска и других городов России.

Механизм и технологические особенности электрофизических методов обработки

У электроэрозионных методов [4] процесс протекает за счет концентрированного теплового источника в форме разряда. В зависимости от параметров разряда известные виды электроэрозионной обработки делятся на подклассы:

- с образованием импульсного разряда в автономном генераторе. К этому подклассу относятся: процесс обработки короткими импульсами, получивший название «Электроискровой метод», который протекает при прямой полярности тока (электрод-инструмент является катодом) в среде жидкого диэлектрика; обработка длительными импульсами, протекающая в жидкой диэлектрической среде при обратной полярности (электрод-инструмент - катодом), получившая название «Электроимпульсный метод»; восстановление геометрических размеров и легирование сплавов; выполняемое на воздухе при обратной полярности тока.

Процесс может протекать путем управления только межэлектродным зазором, хотя возможно взаимное перемещение электродов в других направлениях (вращение, движение по нормали к обрабатываемой поверхности и др.).

Обработка выполняется за счет теплового действия импульсов, расплавления и испарения материала, что вызывает съем припуска с заготовки, формирование поверхностного слоя и частичное разрушение (износ) электрода-инструмента.

В зависимости от формы инструмента электроэрозионную обработку с применением генераторов можно использовать для перенесения на заготовку профиля электрода-инструмента (метод обработки профильным инструментом) или формообразования деталей непрофилированным электродом (рис. 1), который может иметь форму жесткого стержня (а) или проволоки (б).

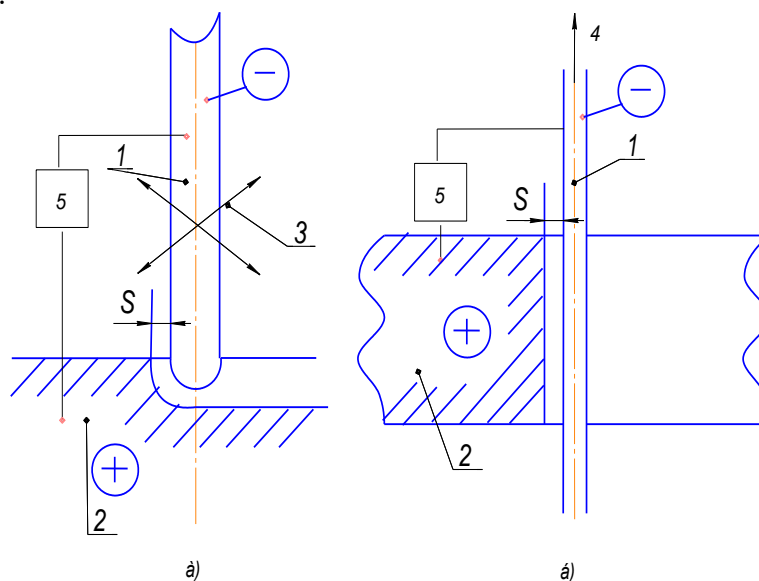


Рисунок 1 – Схема электроэрозионной обработки непрофилированным электродом-инструментом: а) стержневым; б) проволочным.

1 - электрод-инструмент; 2 - токопроводящая заготовка; 3 – возможные направления перемещения одного из электродов (инструмента или заготовки); 4 – направление перемотки проволоки во время протекания процесса обработки; 5 – генератор импульсов; S – межэлектродный зазор (между электродом-инструментом и электродом – заготовкой в период протекания электроэрозионной обработки)

Стержень позволяет получать открытые полости, проволока – разделение материалов (хотя известны случаи использования проволочного электрода для получения «глухих» отверстий и углублений). В случае «б» (рис 1) проволока постоянно перематывается, что позволяет подавать ее в зону обработки без учета износа за счет электрических импульсов, добиваясь этим процесса безизносного разделения материала (строго говоря это процесс «малоизносной» обработки, где инструмент, хотя и изнашивается, но постоянно обновляется). Прямолинейное положение проволоки поддерживается за счет натяжения ее механизмами, предусмотренными в оборудовании.

- с формированием импульса непосредственно в межэлектродном зазоре путем кратковременного касания инструментом заготовки (рис. 2), так называемая «электроконтактная обработка».

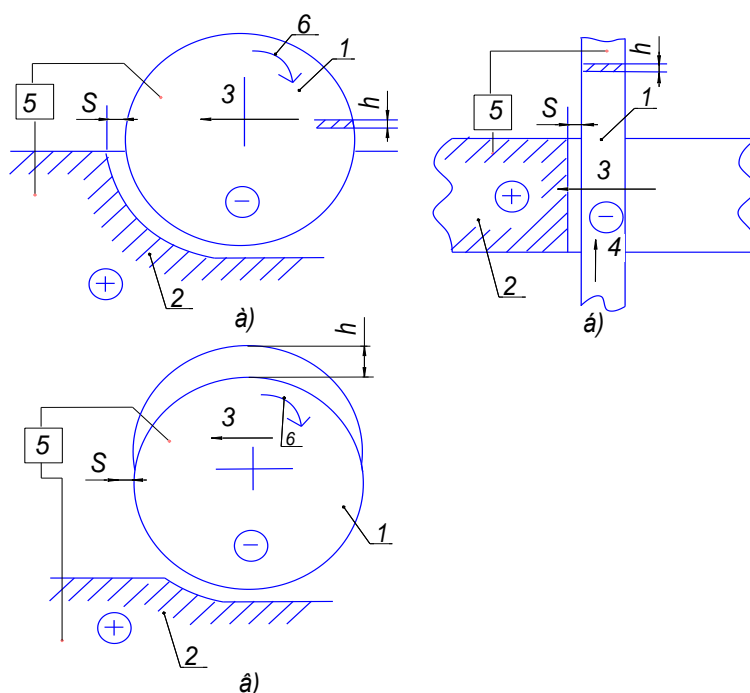


Рисунок 2 – Схема электроконтактной обработки:

- а) – разделение материала диском; б) – разделение материала лентой;
- в) – электроконтактное шлифование

1 – электрод-инструмент (h – ширина электрода-инструмента); 2 – токопроводящая заготовка; 3 – направление подачи при заготовке; 4 – направление продольного перемещения ленты; 5 – источник постоянного тока; 6 – направление вращения электрода-инструмента; S – межэлектродный зазор

Формирование импульса происходит за счет перемещения электрода-инструмента относительно заготовки (вращения на рис. 1, а; в или продольного движения ленты «б» на рис. 1). Здесь в момент касания электрода-инструмента заготовки появляется разрядный ток, который длится до появления межэлектродного зазора « S » после перемещения электрода-инструмента (вращение, продольное движение).

На рис. 2 показаны основные технологические варианты применения электроконтактной обработки:

- разделение токопроводящих заготовок дисковым электродом («а»);

- разделение электродом-инструментом в форме цельной ленты («б»);
- шлифование металлическим диском («в»).

Как и при любом подклассе электроэрозионной обработки процесс протекает в среде диэлектрика. Для разделения дисковым электродом в качестве рабочей среды может применяться окружающий воздух (очень грубый режим обработки) или диэлектрические жидкости, образующие или содержащие в межэлектродном зазоре твердые частицы, способствующие быстрому переходу процесса из контактного в импульсный. Такая же жидкая среда используется при электроконтактном шлифовании.

- электроэрозионное легирование и восстановление геометрических размеров участков металлических деталей, выполняемое при обратной полярности (электрод является анодом) (рис. 3). Процесс протекает, как правило, в газовой среде (в частности на воздухе). Вид (операция легирования) и толщина покрытия (восстановление геометрии) зависят от режимов обработки, материала электрода – инструмента 1 (рис. 3). Толщина покрытия 2 на заготовке 3 зависит от энергии импульса, скорости перемещения электрода-инструмента 1 по траектории 4 его движения, эксплуатационных требований к детали. Свойства покрытия 2 определяются материалом электрода-инструмента 1. Здесь возможно получить толщину покрытия (2) до 1,5 мм, которое состоит из застывших капель (5) (рисунок 3,в), перекрывающих друг друга.

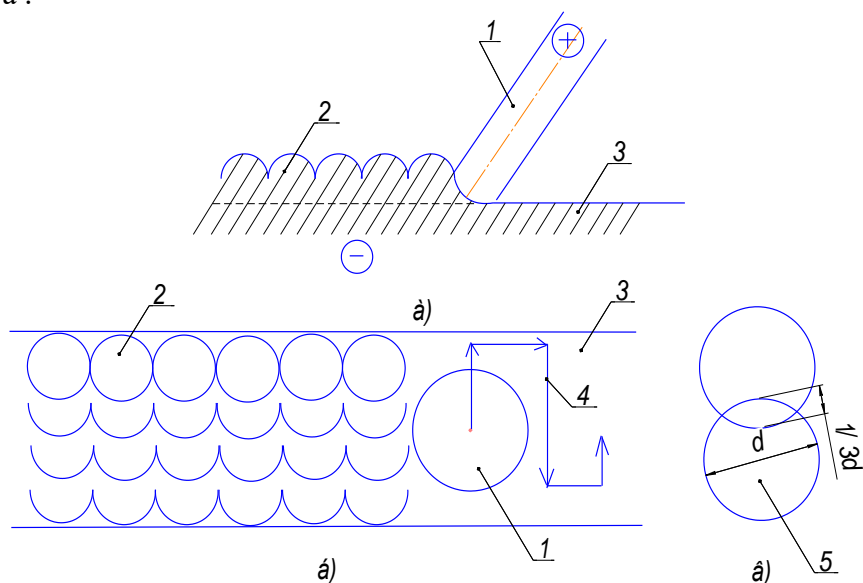


Рисунок 3 – Схема электроэрозионного восстановления геометрии деталей
 а) – получение покрытия; б) – перемещение электрода-инструмента относительно заготовки;
 в) – формирование покрытия

В процессе восстановления геометрии деталей может происходить закалка покрытия (зависит от материала электрода инструмента), что вызывает повышение износостойкости деталей. Обеспечить стабильное перекрытие каплями зоны покрытия удастся только в случае автоматизации перемещения электрода-инструмента (1) по траектории (4) (рис.3, б), что предусмотрено в установках для восстановления геометрии деталей, выпускаемых в Болгарии, Молдавии и России.

Механизм и технологические возможности электрохимической размерной обработки

Электрохимическая размерная обработка (ЭХО) [4] протекает в среде токопроводящих растворов (электролитов), в основном из нейтральных солей, при интенсивной прокачке рабочих сред через межэлектродный зазор (рис.4).

Особенностью процесса является прокачивание через межэлектродный зазор (S) жидкости (электролитов) с различной скоростью ($V_Э$). Электролиты играют следующую роль:

- удаление из зазора (S) продуктов обработки;
- обеспечение компонентами реакций, протекающих в зазоре при анодном растворении материала заготовки;
- создание токопроводящей среды в межэлектродном зазоре.

Применяются две основные схемы ЭХО:

- обработка неподвижными электродами, показанная на рисунке 4;
- схема обработки с поддержанием величины межэлектродного зазора (рис. 4).

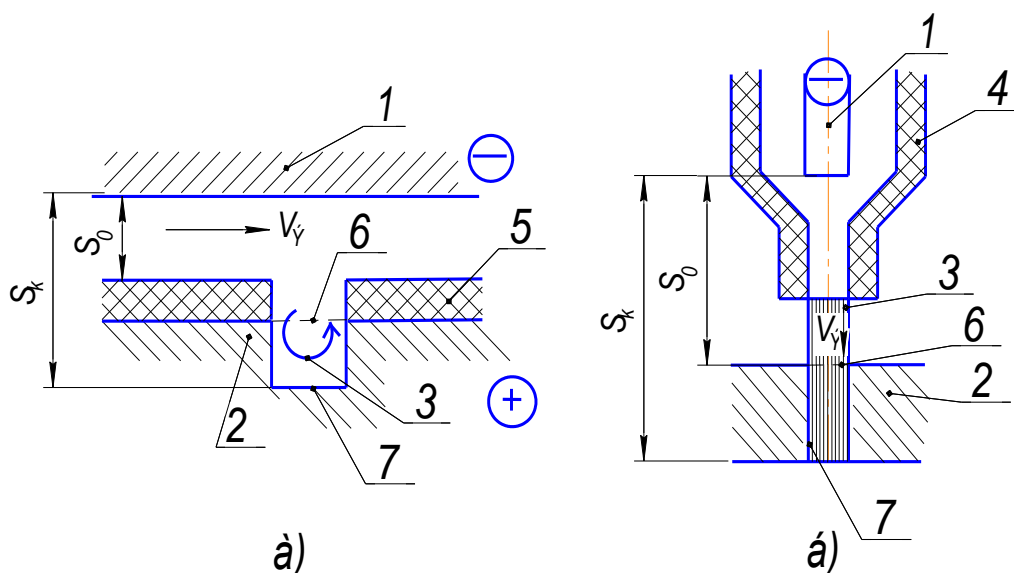


Рисунок 4 – Схема электрохимической размерной обработки неподвижными электродами:

а) – локальная обработка; б) струйное прошивание отверстий

1 – электрод – инструмент (катод); 2 – заготовка (анод); 3 – струя электролита; 4 – корпус форсунки; 5 – диэлектрическое покрытие;

6 – исходная поверхность заготовки; 7 – профиль зоны обработки детали;

$V_Э$ – скорость электролита; S_0 – начальный межэлектродный зазор;

$S_к$ – зазор в конце обработки

В случае подвижных электродов съем материала за счет анодной обработки происходит в местах, открытых для прохождения тока (рисунок 4,а). При этом межэлектродный зазор возрастает на величину удаленного слоя металла заготовки 2 (припуска) и его величина достигнет конечного размера $S_к$.

К обработке неподвижными электродами относится струйная прошивка отверстий 7 (рис. 4, б) малого диаметра путем подачи под высоким давлением струи 3 агрессивного электролита при высоком напряжении между электродом-инструментом 1 и заготовкой 2. Здесь электрод – инструмент 1 размещен в диэлектрическом корпусе 4 форсунки на расстоянии S_0 от обрабатываемой поверхности 6 заготовки 2. под действием струи 3, подаваемой через

форсунку со скоростью V_3 , и тока происходит удаление припуска и образование отверстия 7, когда величина межэлектродного зазора возрастает до конечной величины (S_k).

Управление таким процессом выполняется путем назначения времени обработки (τ), рассчитываемого по зависимости

$$\tau = \frac{1}{2 \frac{\alpha}{\gamma} \eta \bar{\sigma} (u - \Delta u)} z(z + 2S_0), \quad (1)$$

где α - электрохимический эквивалент материала обрабатываемой заготовки; γ - плотность материала заготовки; η - выход по току; $\bar{\sigma}$ - удельная проводимость электролита; u - напряжение на электродах; Δu - потери напряжения на всех участках прохождения тока; z - припуск под обработку (ограничен величиной допустимого конечного зазора S_k).

Наибольшее использование в технике получила схема ЭХО с подвижными (в направлении обработки) электродами путем поддержания параметров межэлектродного зазора S . Технологические применения такой системы приведены на рис. 5, где показаны (по аналогии с механообработкой) варианты реализации процесса обработки.

Особый вариант технологического использования ЭХО представляет вырезание (в том числе разделение) металлических заготовок (1) непрофилированным проволочным электродом (2), перемещаемым в направлении зазора S (рисунок 5, в), поддерживаемым постоянным. В отличие от электроэрозионной обработки проволочным электродом в рассматриваемом случае катод-инструмент не изнашивается и нет необходимости в перемотке проволочного электрода (2). Подача электролита происходит, как правило, вдоль электрода (2) со скоростью V_3 .

Электрохимическое шлифование (рис. 5, г) выполняется металлическим диском 2 с использованием перемещений, свойственных механическому шлифованию. Подача электролита, как правило, выполняется через зазор (S) со скоростью V_3 . Вращение (при круглой заготовке 1) электродов 1;2 создает так называемый «насосный» эффект, эквивалентный подаче электролита под давлением до 0,4 МПа, что снижает потребность в применении систем подачи электролита под давлением в зону обработки.

В схеме протягивания (на рис. 5, д показана обработка внутренней поверхности каналов) межэлектродный зазор (S) поддерживается постоянным за счет выступания над рабочей поверхностью электрода-инструмента 2 наружного профиля диэлектрических направляющих 4, а перемещение (II) зависит от скорости анодного растворения заготовки (1). В направляющих 4 выполнены продольные каналы для подачи электролита со скоростью V_3 . Каналы, как правило, выполняются под небольшим углом к оси электрода-инструмента (2), что обеспечивает интенсификацию очистки межэлектродного пространства от продуктов обработки. Процесс протекает, как правило, при продольной подаче электрода-инструмента 2 с силой «Р», приложенной к штанге 3, которая обеспечивает подвод тока к электроду-инструменту 2, а в ряде случаев (при трубчатой конструкции) служит для подачи рабочей среды (электролита) к рабочей части электрода-инструмента (2). Вращательное движение (III) электрода-инструмента или заготовки выравнивает условия анодного растворения по периметру сечения заготовки (1) и повышает показатели процесса.

Наиболее распространенной является схема прошивания полостей и отверстий (рис. 5, е) путем подачи электрода-инструмента (2) к заготовке (1) с поддержанием стабильной величины межэлектродного зазора (S). Процесс формообразования, особенно отверстий, доста-

точно длительный и точность обработанной части отверстия может значительно нарушаться из-за неконтролируемого анодного растворения боковых поверхностей.

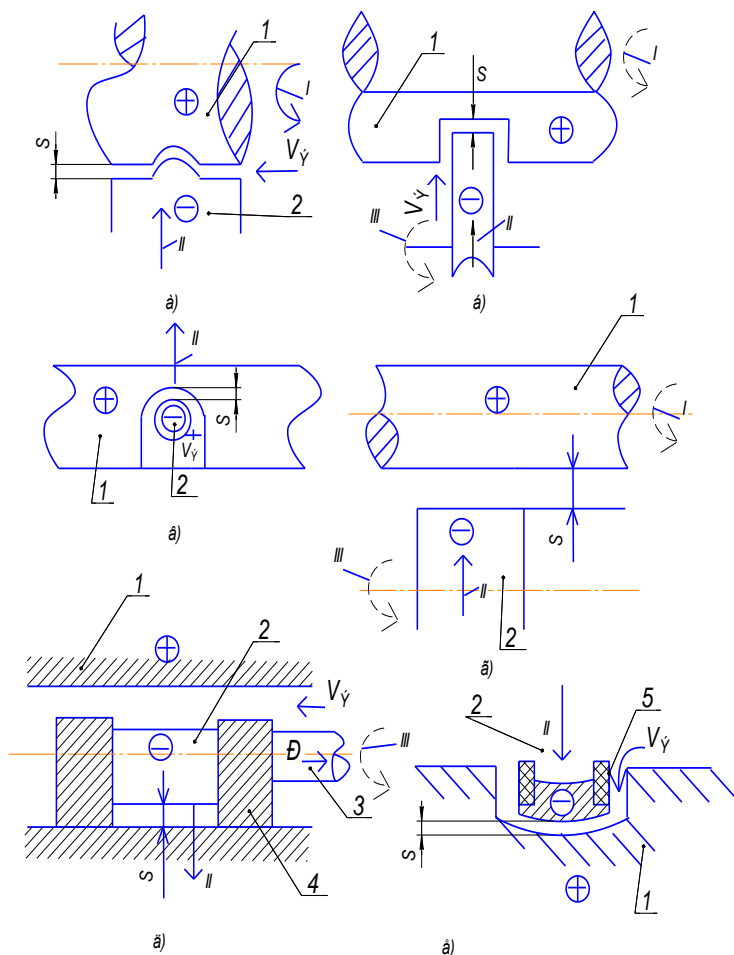


Рисунок 5 – Схема электрохимической размерной обработки с регулированием величины межэлектродного зазора:

- а) – точение; б) – разделение металлических материалов; в) – обработка непрофилированным электродом; г) – шлифование; д) – протягивание; е) – формообразование полостей и отверстий

S – межэлектродный зазор; I – вращение заготовки; II – направление перемещения (подачи электрода-инструмента (катод); III – вращательное движение электрода-инструмента; $V_{Э}$ - движение электролита через межэлектродный зазор; 1 – заготовка; 2 - электрод-инструмент (катод); 3 – штанга для подвода тока и продольного перемещения электрода-инструмента; 4 – направляющая электрода-инструмента; 5 – диэлектрическое покрытие электрода-инструмента

Для устранения этого недостатка на боковую часть электрода-инструмента 2 наносят тонкий слой диэлектрического покрытия (5 на рис. 5,е). Точность ассиметричных отверстий можно повысить, если придать электроду-инструменту (2) вращательное движение.

Процесс ЭХО подвижными электродами требует стабильного поддержания зазора « S » (особенно в направлении подачи электрода-инструмента). Для этого применяются достаточно сложные системы регулирования межэлектродного зазора:

- наиболее доступной и широко используемой является схема так называемого «саморегулирования», когда расчетную величину подачи поддерживают постоянной в течение всего периода обработки. Однако условия протекания процесса могут существенно изменяться, например из-за колебания напряжения в сети свойств электролита при различной его загрязненности и температуры материала заготовки и др. Любое изменение условий обработки вызывает изменение (как правило, незначительное) величины зазора, который самостоятельно корректируется за счет компенсации изменений процесса обработки (отсюда название «саморегулируемая» схема). Такие изменения возможны в узких пределах. Иначе может появиться металлическое касание электродов и короткие замыкания, способные разрушить обрабатываемый участок заготовки и электрод-инструмент;

- схема циклической подачи электрода-инструмента, когда установленный при настройке межэлектродный зазор поддерживается определенной время при неподвижных электродах или по схеме «саморегулирования», после чего технологический ток автоматически отключается, электрод-инструмент ускоренно сближается до касания с зоной обработки заготовки, затем быстро отводится на установленную в начале величину зазора, подается ток и процесс повторяется. Во время сближения и отвода электрода-инструмента создается так называемый «насосный эффект», способствующий эффективной очистке межэлектродного пространства. Для реализации схемы требуется достаточно сложная (а следовательно дорогая и не всегда надежная) система регулирования межэлектродного зазора. Кроме того, прерывание процесса анодного растворения на время корректировки зазора снижает производительность обработки.

- импульсно-циклическая схема подачи включает регулирование цикла подачи технологического тока, который может отключаться либо при сближении электродов (схема предложена учеными Ленинграда) или при их расхождении (изобретение ученых Тулы). Это позволило увеличить время формирования геометрии зоны обработки при очень малых зазорах и обеспечить повышенную точность деталей. Без циклического перемещения электрода-инструмента по одной из приведенных схем не удалось стабилизировать (при малых зазорах) очистку межэлектродного зазора от продуктов обработки и реализовать процесс высокоточного формообразования, особенно полостей.

- схема стабилизации межэлектродных зазоров с постоянным базированием на исходную поверхность заготовки, так называемая схема ЭХО «катодом нежесткой конструкции» (разработка ученых Воронежа и Казани). Здесь форма рабочей части электрода-инструмента изменяется в зависимости от геометрии предварительно сформированной поверхности. Это позволяет обрабатывать изделия с переменной формой и размерами (в частности сечений каналов), при любых размерах зоны обработки. Ограничением использования такой схемы является необходимость предварительной подготовки геометрии заготовки с обеспечением точности профиля не ниже установленного для детали. Поэтому рассматриваемая схема пока используется на стадии чистовой обработки, в основном, для крупногабаритных изделий с каналами переменного профиля и сечения.

Применение в промышленности ультразвуковой обработки

Ультразвуковая обработка (научная школа чл-кор. А Н РФ Приходько В.М.) [5] имеет широкий диапазон технологических приложений, выходящих за границы механической обработки. На рис.6 приведены наиболее известные схемы с использованием ультразвуковых воздействий на объект обработки.

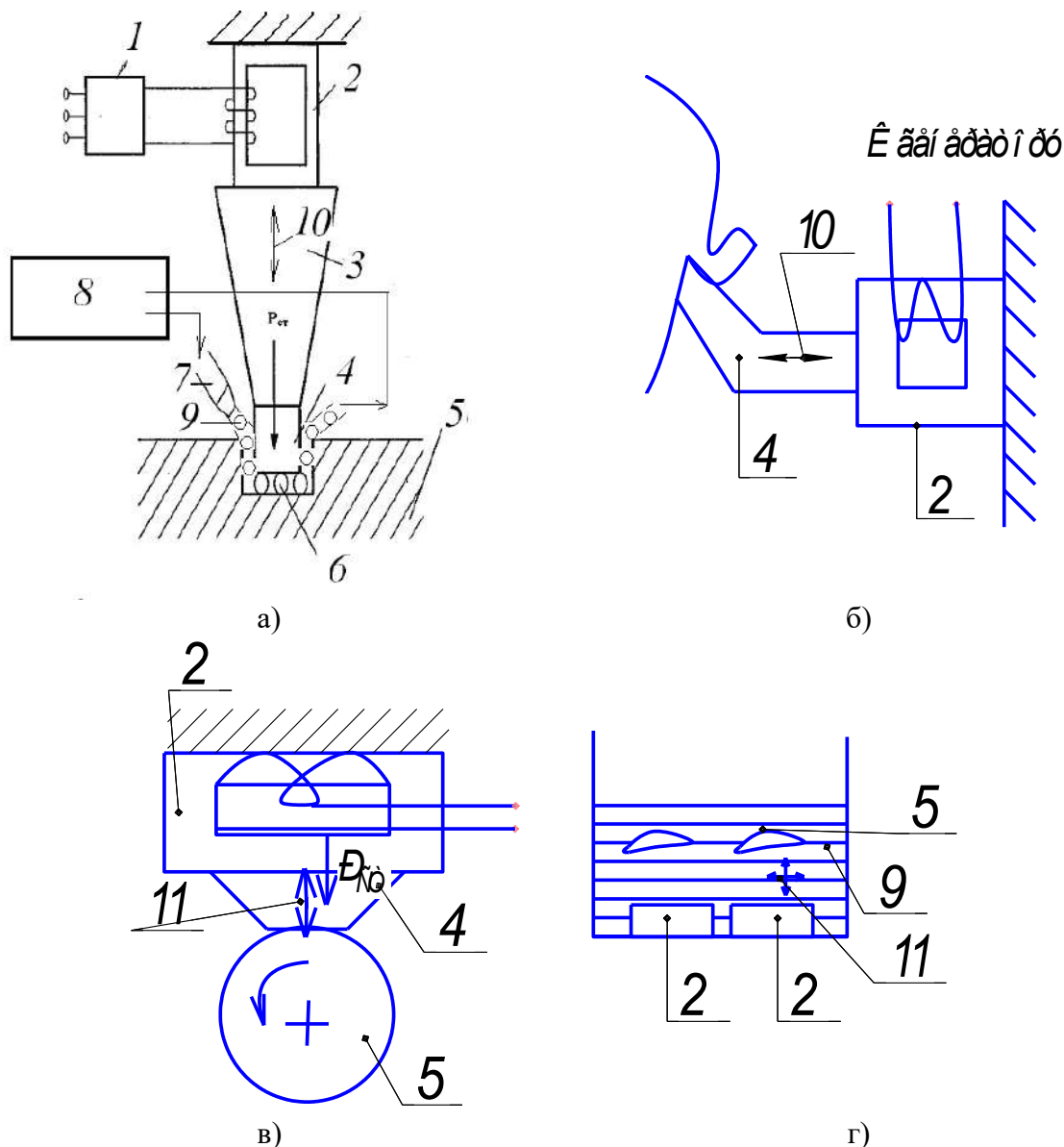


Рисунок 6 – Ультразвуковая обработка:

- а) – схема размерной обработки; б) – интенсификация точения;
 в) – ультразвуковое упрочнение; г) – ультразвуковая промывка и очистка изделий
 1 – ультразвуковой генератор; 2 – преобразователь (магнитостриктор);
 3 – концентратор; 4 – инструмент; 5 – заготовка; 6 – абразивные зерна;
 7 – насадка для подачи рабочей среды (суспензии); 8 – система подготовки и подачи суспензии; 9 – суспензия (смесь жидкости с твердыми гранулами); 10 – направления ультразвуковых колебаний; $P_{ст}$ – статическая сила прижима инструмента к заготовке

Ультразвуковая обработка является самостоятельным технологическим приемом, но ее использование в комбинированных процессах находит обширное применение, поэтому полезные свойства и влияния на другие виды воздействий, в том числе на электроэрозионные и электрохимические, дает возможность проектировать эффективные методы комбинированной обработки с использованием электрического поля. Размерная ультразвуковая обработка (рис/ 6, а) дает возможность получать полости, отверстия, углубления любой формы в

хрупких материалах. Операция выполняется за счет возвратно-поступательных перемещений (10 на рис.6, а) вдоль оси инструмента (4) соединенного с концентратором (3) и преобразователем (2) электрических импульсов генератора (1) перемещения. Инструмент (4), имеющий сечение и форму обрабатываемой поверхности заготовки (5), производит импульсные воздействия на абразивные зерна (6), поступающие в зону обработки через насадку (7) в виде суспензии (9) из системы (8). Зерна (6) скалывают частицы с хрупкого материала заготовки 5 и формируют углубления. В качестве суспензии (9) используют абразивные порошки (6), смешанные с водой и химически активными добавками для защиты материала заготовки 5 от коррозии и интенсификации процесса удаления припуска (например, 15% раствор серно-кислой меди). В начале обработки инструмент (4) прижимают к абразивным зернам (6) с силой $P_{ст}$.

Одним из направлений использования ультразвуковой обработки является интенсификация процессов механического точения (рис.6, б), где инструменту придаются продольные колебания (10), что снижает силы резания, особенно при обработке вязких материалов, за счет устранения их налипания на режущие кромки инструмента.

На рис.6, в показана схема ультразвукового упрочнения, которая может использоваться в комбинированных методах обработки.

При ультразвуковой промывке и очистке изделий (рис.6, в) резко возрастает активность воздействий химически активной жидкости или суспензий (9).

Технологические возможности лучевых методов обработки

С целью использования в комбинированных процессах технологических возможностей лучевых методов обработки рассмотрены свойства электронно-лучевой, плазменной и лазерной обработки [6;7]. В настоящее время электронно-лучевая обработка в комбинированных процессах не нашла широкого использования, т.к. здесь требуется вакуумирование, что достаточно дорого и трудно осуществимо. Плазма (обработка ионным лучом) нашла применение, как эффективный способ нагрева зоны формообразования заготовки. Аналогичное воздействие оказывает лазер (световой луч), который, кроме того, интенсифицирует процесс электрохимической размерной обработки на наноуровне. Недостатком всех лучевых методов является необходимость достижения лучом зоны обработки, которая находится в не всегда доступной зоне и достижение им зоны обработки усложняется по мере загрязнения электролита гидроксидами, что вызывает необходимость в постоянной замене рабочей среды.

Импульсные методы обработки

Импульсные методы обработки [2] с механическим или магнитным воздействием на зону формообразования оказались перспективными в комбинированных методах для создания импульсных электромагнитных воздействий, деформации деталей, очистки от загрязнений.

Проектирование и создание комбинированных методов обработки с использованием электрических воздействий.

Основным направлением исследований в области ЭМО стало проектирование и создание комбинированных методов (КМО) [7;8;9;10], сочетающих в одном процессе нескольких видов воздействий (рис.7), где рассмотрены механические, тепловые, химические, магнитные и ядерные виды энергии, а также новые комбинированные технологические процессы, нашедшие применение в промышленности.

Анализ известных физических воздействий и их разновидностей дает основания утверждать, что при различных сочетаниях имеющихся способов можно спроектировать более 800 новых технологических процессов, имеющих высокие показатели. Это следует рассматривать как новый этап развития технологии обработки, эффективно расширяющий известные приемы механообработки.

Из рис.7 видно, что изученные комбинированные методы с наложением электрического поля, отражающие исследования отечественных научных школ в этой отрасли, охватывают не более 1,5% от теоретически возможных. Наиболее полно перспективы проектирования рассматриваемых технологических процессов приведены в [2;7].

Наибольшее применение нашел метод электроэрозионно-химической обработки, соединяющий тепловое и химическое воздействие. Схема метода приведена на рис.8. Механизм протекания процесса объединяет полезные свойства каждого воздействия. Так электроэрозионная (тепловая) составляющая разрушает оксидные пленки, ограничивающие силу технологического тока при электрохимическом (химическом) процессе, а последний фактор уменьшает износ электрода-инструмента (1 на рис. 8), что способствует повышению точности обработки. В рассматриваемом методе используется профильный электрод-инструмент (1), подаваемый к заготовке (2) со скоростью, обеспечивающей наличие межэлектродного зазора «S». Для увеличения насосного эффекта при очистке рабочей среды (6) в зоне обработки, одновременно с подачей (5) электрод-инструмент (1) может иметь вибрационные движения (8) вдоль оси электрода-инструмента. Для осесимметричных отверстий часто используется вращение (7) инструмента. Технологический ток подается от двух источников: импульсного (3) для формирования эрозионной составляющей комбинированного процесса и выпрямителя (4) с униполярным постоянным или импульсным током.

Метод электроэрозионнохимической прошивки значительно расширяет технологические возможности каждого составляющего воздействия: повышает точность, качество поверхностного слоя, производительность, улучшает экономические показатели процесса. Метод эффективен при незначительной (до 3-4 мм) глубине обработки, после чего формируется ограничение в виде сопротивления выноса из зазора жидкости с продуктами обработки (6), которое возрастает по мере углубления отверстия или полости и далее интенсивность обработки становится близкой к одному из составляющих комбинированного метода.

Широко используется в промышленности электроабразивная обработка (рис.9, где в качестве режущих элементов используются нетокопроводящие зерна (3) известных материалов (включая алмазные).

В промышленности применяется 3 варианта электроабразивной обработки (рис.9). При прямой полярности, когда электрическое поле способствует интенсификации съема припуска, где абразивные зерна выполняют, в основном, функции депассивации поверхности. Такая схема наиболее эффективна в случае чистовой обработки твердых (труднообрабатываемых) материалов. В случае использования обратной полярности (заготовка-катод) анодное растворение происходит с инструмента (1) в зоне закрепления зерен (3). За счет этого удаляется материал, снятый с заготовки (2) и налипающий на зерна (3). Такая схема имеет место при шлифовании вязких материалов типа меди, латуни. При проектировании процесса с обратной полярностью необходимо назначать режимы электрического поля с учетом удаления только налипшего материала, иначе произойдет осыпание с инструмента (1) зерен (3) и нарушение точности обработки. В случае правильного регулирования анодного процесса при этом варианте обеспечивается постоянная режущая способность инструмента (1) и практически устраняется его износ, что обеспечивает стабильную точность обрабатываемого профиля заготовки (2). К третьему варианту обработки по схеме на рис. 9 относится процесс с периодическим изменением полярности и управлением величиной тока, используемого для

анодного растворения налипшего на зерна (3) материала заготовки (2). Это наиболее эффективный, но достаточно сложный и дорогой вариант электрообразивной обработки, который в настоящее время находится в стадии экспериментальных исследований.

Значительные перспективы имеет непрофилированный инструмент в форме плоской или дисковой (4) щетки (рисунок 10), который позволяет выполнять операции размерной и безразмерной обработки заготовки (2) проволочным инструментом (1) путем его перемещения (5) и вращения (3) (для дисковых электродов-щеток).

Здесь имеет место тепловое (эрозионное), химическое (электрохимическая размерная обработка), механическое (аналог крацевания) и магнитное воздействие. Сочетание таких воздействий в комбинированном процессе позволяет снизить негативные технологические показатели каждого из них (главным образом большой износ инструмента, неконтролируемый наклеп, нарушение качества поверхностного слоя) и получить универсальный инструмент для черновой и чистовой обработки материалов с различной проводимостью.

В ряде оборонных отраслей (оружейные, авиакосмические производства) применяется разработанный и запатентованный учеными Воронежа и Казани метод протягивания [9;7] (рис. 11), осуществляемый по новой схеме подачи электрода-инструмента с постоянной силой « P ».

При реализации этой схемы съем металла с внутренней (рис. 12) и наружной поверхности заготовки происходит за счет анодного растворения рабочей частью электрода-инструмента (1), ток (а в ряде случаев и рабочая среда) к которому подается через штангу (13) (иногда гибким токопроводом). Межэлектродный зазор « S » поддерживается выступающей по периметру частью диэлектрических направляющих (3;4) с отверстиями (5) и пазами (6;7) для прокачки электролита. Рабочая часть (1) соединена с дорнующим элементом (2) тягой (8); упругим элементом (10); На внутренней части рабочей части установлен прерыватель тока со штоком (11); диафрагма (9) и задняя диэлектрическая прокладка (12) предохраняют деталь от рассеивания тока; Дорнующий элемент (2) удерживает перемещение штанги (13) до тех пор, пока припуск под обработку заготовки напротив рабочей части (1) не снизится до величины, необходимой для получения дорнующим элементом (2) расчетного наклепа, обеспечивающего наилучшие эксплуатационные свойства упрочненной поверхности заготовки. . Таким образом достигается высокая точность и прочность деталей при многоцикловых нагружениях.

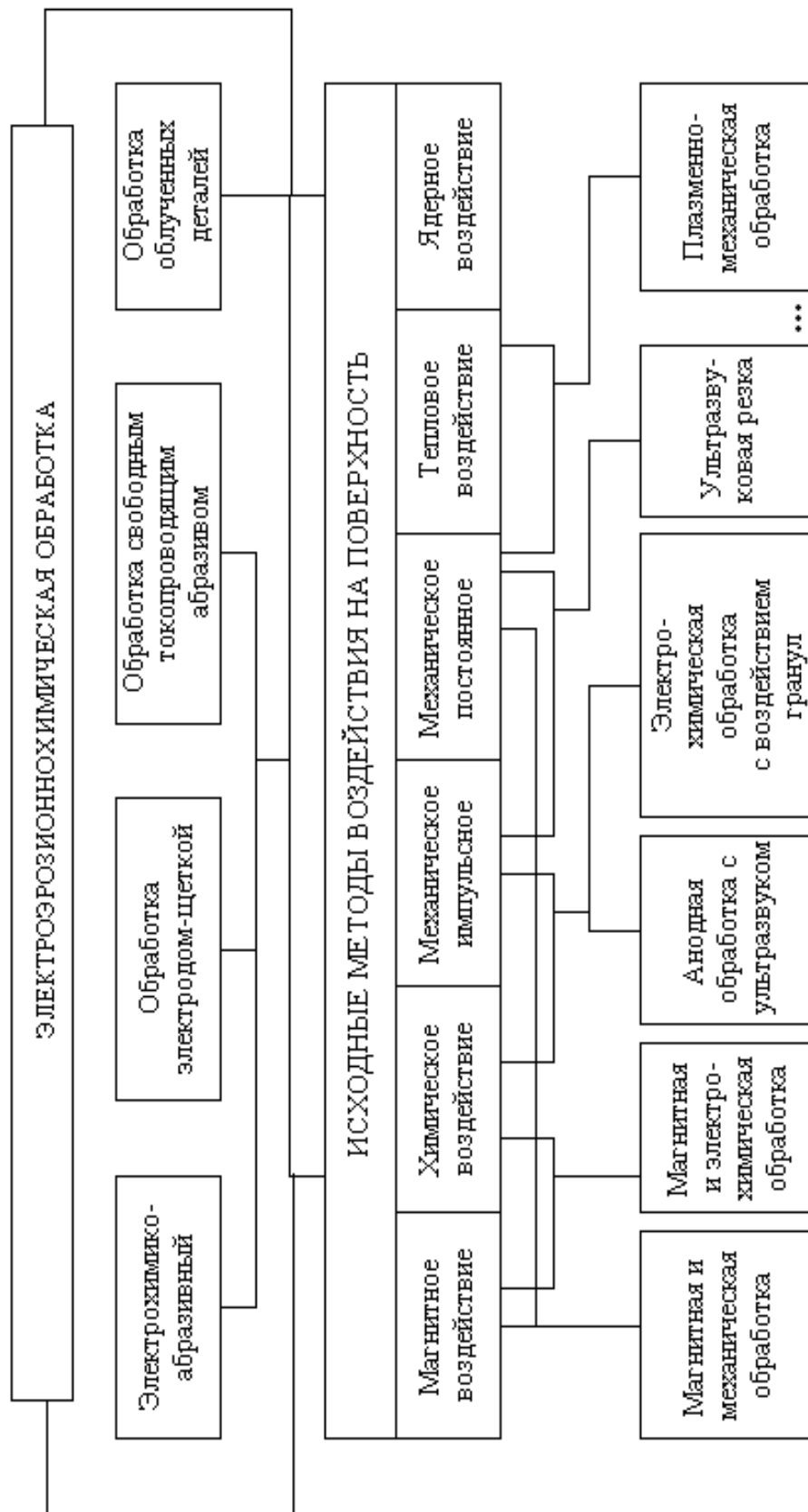


Рисунок 7 – Воздействия и способы комбинированной обработки с наложением электрического поля

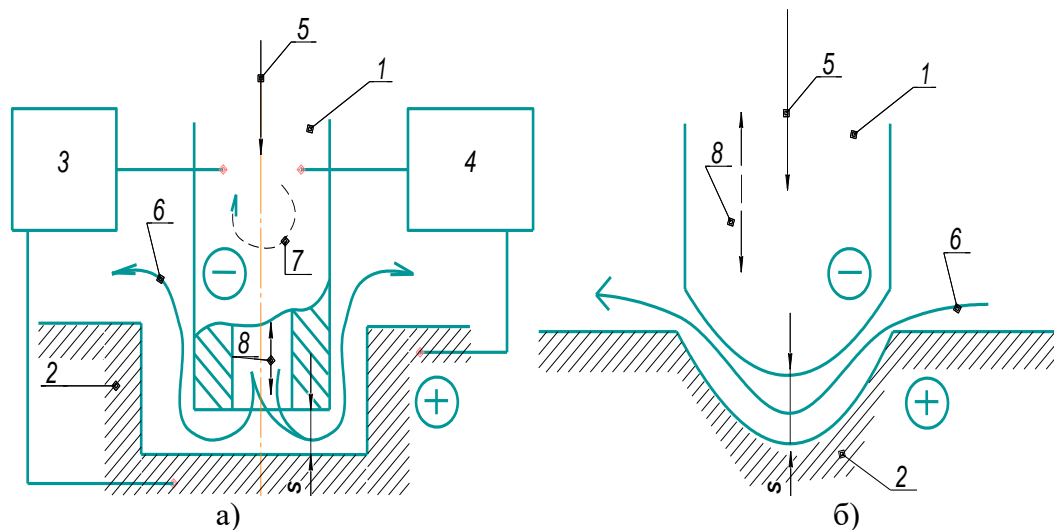


Рисунок 8 – Схема электроэрозионнохимической прошивки

а) – отверстий; б) – полостей

1 – электрод – инструмент; 2 – заготовка; 3 – электроэрозионный генератор;
4 – униполярный выпрямитель тока; 5 – подача электрода-инструмента для поддержания межэлектродного зазора «S»; 6 – траектория движения рабочей среды; 7 – возможное вращательное движение электрода-инструмента;
8 – вибрация электрода-инструмента вдоль его оси

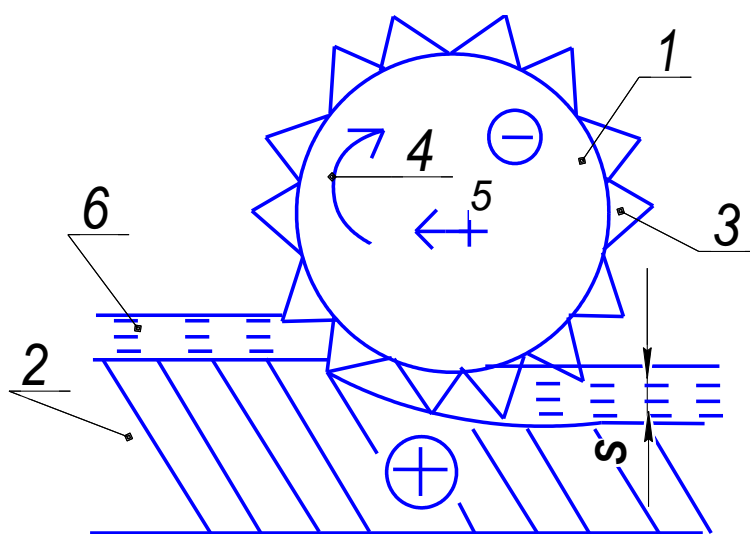


Рисунок 9 – Схема электроабразивной обработки

1 – абразивный токопроводящий инструмент; 2 – заготовка; 3 – абразивные зерна;
4 – вращательное движение электрода-инструмента; 5 – рабочая подача электрода-инструмента; 6 – рабочая среда

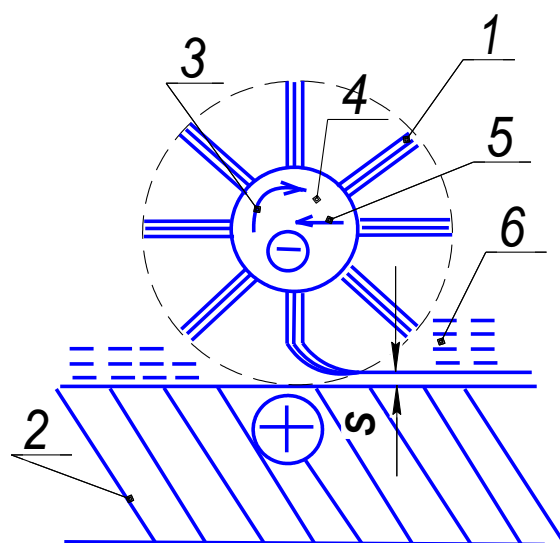


Рисунок 10 – Обработка непрофилированным электродом-щеткой
 1 – пучки металлической проволоки; 2 – заготовка; 3 – вращательное движение электрода-щеткой; 4 – металлический диск; 5 – рабочая подача электрода-щеткой; 6 – рабочая среда

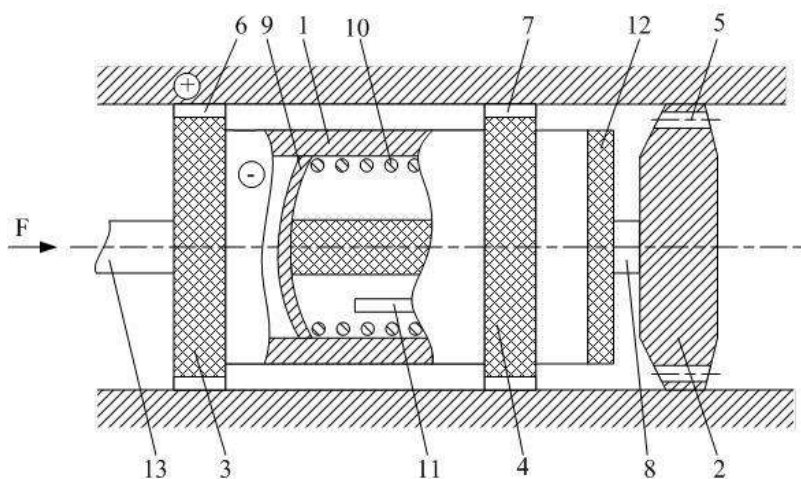


Рисунок 11 – Схема протягивания с гарантированным наклепом поверхности
 1-рабочая часть электрода-инструмента; 2- дорнующий элемент; 3-передняя диэлектрическая направляющая; 4-задняя диэлектрическая направляющая; 5- отверстия для пропускания электролита; 6; 7-пазы для пропускания электролита; 8-тяги для связи с дорнующим элементом; 9 диафрагма; 10-упругий элемент; 11-шток механизма выключения подачи тока на рабочую часть электрода-инструмента; 12 задняя диэлектрическая прокладка; 13- штанга для подачи электролита и перемещения электрода-инструмента под действием осевой силы «P»;

Известны исследования по созданию и применению комбинированной обработки путем интенсификации анодного процесса лучом лазера [11] (рис. 12).

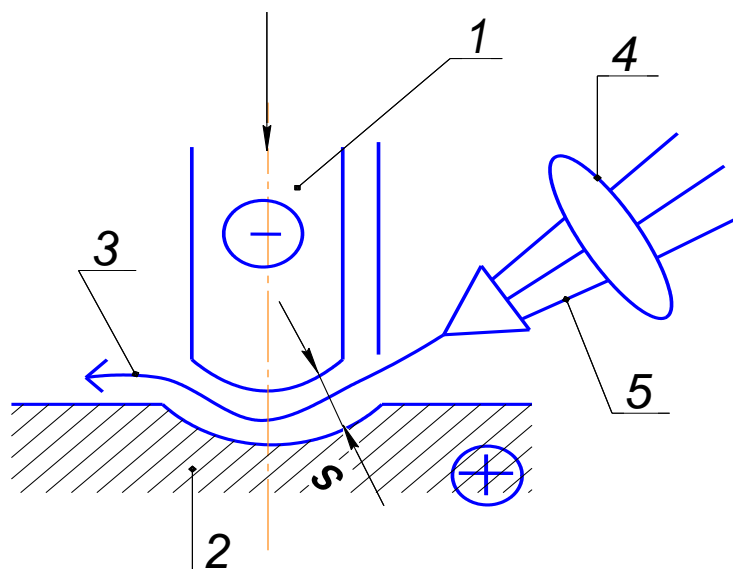


Рисунок 12 – Схема электрохимической размерной обработки с облучением зоны обработки лучом лазера:

1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка; 3 – поток рабочей среды; 4 – линза лазера; 5 – луч лазера; S – межэлектродный зазор

При использовании схемы электрохимической размерной обработки с облучением зоны обработки лучом лазера [2;6;7] (рис 12) пока не преодолена проблема подачи в зону обработки луча (5) лазера, т.к. электрод-инструмент (1), как правило, не прозрачный, а рабочая среда (3), прокачиваемая вдоль обрабатываемого участка заготовки (1) через межэлектродный зазор «S», быстро загрязняется и становится не прозрачной при любой концентрации луча (5) линзами (4). Приходится постоянно заменять среду «3» даже в случае доступности зоны обработки заготовки (2) облучению.

Схема на рис. 13 поясняет сущность комбинированного процесса чистовой обработки [12] (в частности полировки, приведенной на рис.13) за счет химического и механического воздействия на заготовку (3).

В качестве диэлектрического притира (1) можно использовать как абразивные, так и гладкие поверхности. В частности, известен положительный опыт использования буковых брусков, перемещаемых с прижимом «P» по обрабатываемому участку заготовки (3). Металлические катоды-инструменты (2) установлены с зазором «S» в углубления притира (1) и перемещаются вместе с ним по заготовке 3 в направлениях 4. Механическое воздействие притира (1) удаляет окислы с выступов микронеровностей заготовки (3), где происходит ускоренное анодное растворение материала и интенсивная чистовая обработка (полирование) поверхности.

Для изготовления отверстий (в основном мелких) любой формы (в том числе переменной) большой глубины учеными Воронежа, Москвы предложен комбинированный метод электрохимической обработки с наложением на рабочую среду ультразвуковых колебаний [5;2] (рис. 14).

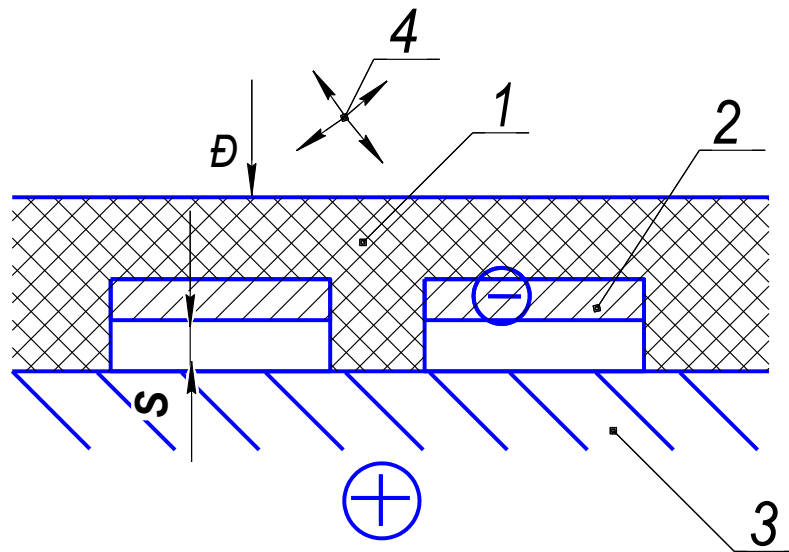


Рисунок 13 – Схема электрохимической полировки с механической депассивацией поверхности:

- 1 – диэлектрический притир; 2 – катод-инструмент; 3 – заготовка;
 4 – направления перемещения катода-инструмента относительно заготовки;
 P – прижим катода-инструмента к заготовке; S – межэлектродный зазор

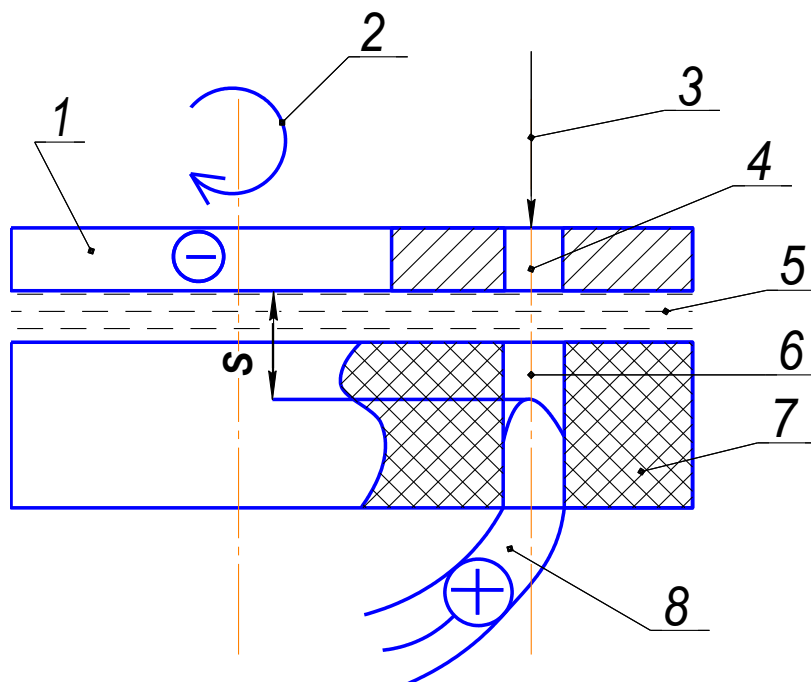


Рисунок 14 – Схема получения отверстий большой глубины с наложением ультразвука:

- 1 – катод-инструмент; 2 – вращение катода-инструмента;
 3 – ультразвуковой концентрированный луч; 4 – отверстие в катоде-инструменте;
 5 – рабочая среда; 6 – отверстие в заготовке 7;
 8 – металлическая вставка – анод; S – межэлектродный зазор

Метод на рис. 14 осуществляется при обработке прессованных заготовок (7) из диэлектриков, в которые заложены металлические вставки (8), имеющие профиль получаемого отверстия (6)). Вставка (8) подключается к источнику тока (анод) и в процессе анодного растворения в рабочей среде (5) (электролит) удаляется, образуя отверстие (6) любой (постоянной или переменной) формы и сечения. Без использования ультразвука (3) глубина обработки не превышает 0,5-1,0 диаметра отверстия, т.к. по мере возрастания зазора «S» и снижения скорости эвакуации продуктов обработки из отверстия (6) процесс анодного растворения вставки (8) прекращается. Для подвода ультразвукового луча (3) к зоне обработки в катод-инструменте (1) имеется отверстие (4), соосное с отверстием (6) в заготовке (7). Катод-инструмент (1) вращается (2) и в момент совпадения положения осей отверстий (4) и (6) через (4) подается концентрированный луч (3), который в технике получил термин «ультразвуковая сирена». Под действием луча (3) происходит очистка отверстия (6) от продуктов анодного растворения, а при дальнейшем перемещении электрода-инструмента (1) происходит удаление части вставки (8). При этом облучается катод-инструмент (1), однако он выполняется из вязкого материала и под действием ультразвука не разрушается. Луч (3) способен отражаться от стенок отверстия (6) и интенсифицировать процесс анодного растворения вставки (8) даже в случае криволинейных отверстий (6).

В рассматриваемом методе (рис.14) используются механические импульсные и химические воздействия, позволяющие за счет взаимного полезного влияния решить проблему получения в диэлектрических материалах глубоких отверстий малого диаметра с прямой и криволинейной осью произвольного сечения с плавным переходом по длине отверстия.

К комбинированным методам относится струйный метод (рассмотрен на рисунке 3) с использованием металлических гранул [10] (рис 15).

Гранулы (3) вместе с рабочей средой (2) (обычно электролит) достигают поверхности заготовки (4), вызывают локальный наклеп поверхности заготовки (4) и производят местное анодное растворение за счет заряда, полученного при перемещении в сопле (1).

Здесь имеет место механическое импульсное воздействие на заготовку (4) токопроводящих (металлических) гранул (3), которые вызывают местный наклеп поверхности и ускорение химического процесса анодного растворения в местах соударения. При ограниченном времени воздействия гранул происходит, в основном, снижение микронеровностей, т.е. это чистовая безразмерная обработка, особенно при изготовлении деталей с внутренними полостями, имеющими ограниченный доступ в случае использования металлорежущего инструмента.

В схеме на рис. 16 (показан пример использования [2;7] постоянного магнита (5), перемещаемого (6) вдоль и поперек поверхности заготовки (4) с насыпанным на нее абразивом (3). Ферромагнитные гранулы абразива (3) перемещаются (7) в зависимости от магнитного поля в районе нахождения магнита (5) и производят депассивацию поверхности заготовки (3), что ускоряет анодный процесс выравнивания микронеровностей электродом-инструментом (1). Обработка может выполняться только за счет механического воздействия гранул (3) магнитным полем от электромагнита с бегущей волной, но без химической составляющей процесс полировки достаточно медленный.

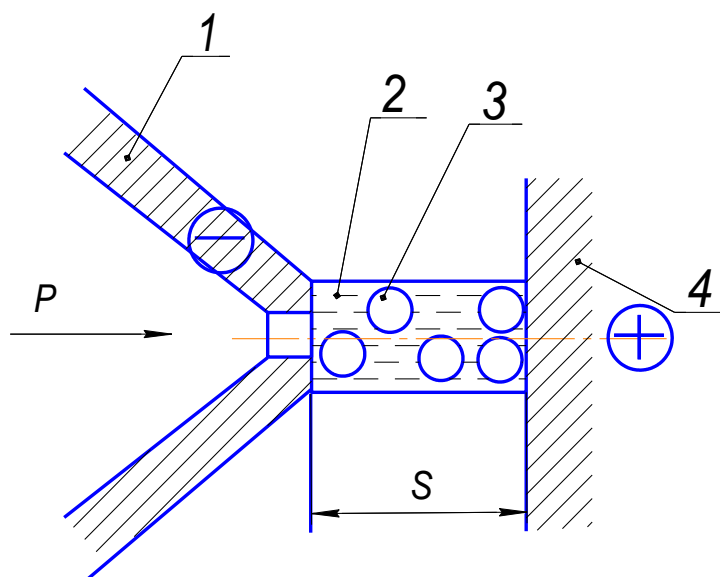


Рисунок 15 – Схема струйной обработки потоком металлических гранул:
1 – сопло-токопровод; 2 – рабочая среда;
3 – металлические гранулы; 4 –заготовка;
S – межэлектродный зазор

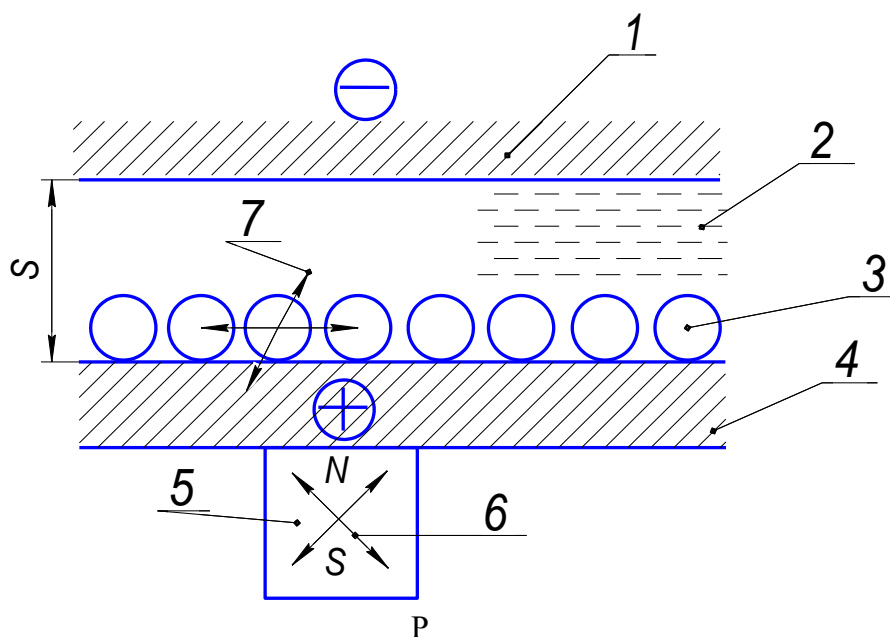


Рисунок 16 – Схема электроабразивной полировки в магнитном поле
1 – электрод-инструмент; 2 – рабочая среда; 3 – ферромагнитные абразивные гранулы;
4 – заготовка; 5 – магнит (N,S - полюса);
6 – направление перемещения магнита; 7 – направление перемещения гранул;
S – межэлектродный зазор

Технологические возможности и перспективы использования электрических методов обработки

Для использования электрических методов обработки необходимо представлять технологические возможности каждого метода, а также недостатки, ограничивающие их применение. Основным направлением в использовании электрических методов является выполнение технологических операций, вызывающих затруднения при механической обработке. Перспективным этапом расширения технологических возможностей рассматриваемых методов является проектирование комбинированных процессов [2;7;13] с управляемым изменением уровня полезных воздействий и устранения (или снижения) негативных факторов в новом технологическом процессе.

В таблице приведены технологические показатели электрофизических и электрохимических методов обработки в сравнении с базовым вариантом механической обработки точением конструкционной стали 45. Фактически электрические методы наиболее эффективны при изготовлении деталей из труднообрабатываемых сплавов (например, механическая обработка сплава ЖС-6 составляет не более 3-4 % от такого же показателя для стали 45). Возможность обработки электрическими методами с использованием подачи инструмента только в направлении подачи (схема прошивки) значительно расширяет технологические возможности рассматриваемых процессов и позволяет реализовать замыслы проектировщиков новой техники, особенно сложных изделий авиационной и космической отрасли.

В литературе часто используется термин «экономически достижимые показатели процесса», т.е. возможность получения качественного изделия при минимальных затратах на его изготовление. Обычно выбор варианта технологии обработки, направленного на снижение затрат, выполняется при отработке технологичности на стадии освоения и запуска в производство новой продукции с учетом возможности доработки конструкции, экономических и организационных мероприятий. Материалы, приведенные в таблице, позволяют выполнить исследования по технологичности конструкции и служат базой для проектирования комбинированных методов. Сравнение технологических показателей обработки показывают, что при сочетании различных воздействий и методов обработки (таблица 1) можно значительно снизить отрицательные показатели (например, износ инструмента при электроискровой обработке по сравнению с эрозионно-химическим методом) и повысить другие технологические возможности каждого из комбинированных процессов. Анализ технологических возможностей электрофизических и электрохимических методов обработки (таблица 1) позволяет разработать укрупненный алгоритм обоснования преимущественного использования различных применений этих методов.

№ показателя	Виды обработки		Электронская				Электроконтактная разрезка		Ультразвуковая размерная		Электрохимическая		Лазерная
	Показатели	Единица измерения	Чистовое точение	Сталей	Твердых сплавов	Электроинструментальная	В воздушной среде	В жидкой среде	Стале	Твердый сплав	Прошивка	Объемное формообразование	
1	Производительность	мм ³ мин	3000	600-800	400-600	(10-15)*10 ³	(40-50) *10 ³	(20-25) *10 ³	300	50-100	(1-2) *10 ³	(1-3) *10 ³	300-400
2	Шероховатость	Ra, мкм Rz, мкм	6	3-5	1,6-3,2	50-200	200-300	100-250	2,5	1,0-1,5	0,32- 0,64	0,32-0,64	40 (местная до 1,5 мкм)
3	Точность	класситет	10	6-7	4-7	9-10	15-17	13-15	9-10	6-9	9-10	9-10	15-17
	Погрешность	мкм		0,003-0,01 (непрофилиро- ванный проволочный электрод)	0,003- 0,005 (проволоч- ный элект- род)	0,2-0,3 (углеродисто- вый элект- род)						0,02-0,05 (импульсно - циклическая схема обра- ботки)	0,1-0,3 (при ма- лой глу- бине про- шивки)
4	Износ инструмента	% от снятого материала	0,1-0,5	15-20 (8-10 при вольфрамовом электроре)	30-35	2-5 (0,5-0,8 при углеродистых электродах)	30-70	20-25	25-30	35-40	нет	нет	нет
5	Энергоемкость	Квт*час кг	1-2	15-25	25-30	5-6	2-3	5-6	150- 200	200-300	15- 20	10-15	До400

Выводы

Приведенный в работе материал позволяет обосновать область эффективного использования электрофизических, электрофизических и комбинированных методов обработки в машиностроении. Положительный опыт, накопленный в авиакосмической отрасли, позволяет технологам успешно выполнять процессы отработки технологичности новых изделий для всей продукции машиностроения. Это способствует повышению конкурентоспособности отечественных изделий на мировом уровне.

Список литературы

1. Машиностроение. Энциклопедия. Технология изготовления деталей машин. Т III-3/ Под ред. А.Г.Суслова. М.: Машиностроение, 2000. – 840 с.
2. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки // М.: Машиностроение, 2005. – 511 с.
3. Научно-технические технологии в машиностроении / Под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. - 528 с.
4. Смоленцев В.П. Технология электроэрозионной и электрохимической обработки / В.П.Смоленцев, А.И. Болдырев; Г.П.Смоленцев. Воронеж: ВГТУ, 2005. - 180с.
5. Приходько В.М. Ультразвуковая технология в машиностроении/ Научно-технические технологии в машиностроении. Раздел 9. М: Машиностроение, 2012
6. Коваленко В.С. Лазерная технология // Киев: "Выща шк.", 1989. - 280 с.

-
7. Комбинированные методы обработки / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, А.В. Кузовкин, Г.П. Смоленцев, А.И. Часовских // Воронеж: ВГТУ, 1996. - 168 с.
7. Справочник технолога-машиностроения. В 2т. Т.2. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова и др. 5-ое изд. М:Машиностроение, 2001.- 944 с.
8. Кириллов О.Н. Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом. Воронеж: ВГТУ, 2010. - 254 с.
9. Болдырев А.И. Электрохимикомеханическая обработка. Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2012. - 243 с.
10. Кузовкин А.В. Размерное формообразование сложнопрофильных деталей с применением твердого токопроводящего наполнителя / А.В. Кузовкин, В.П. Смоленцев. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2000. - 176 с.
11. Справочник технолога / Под ред. А.Г. Суслова. М:Инновационное машиностроение, 2019.- 800 с.
12. Иванов В.В. Вибрационные механохимические методы нанесения покрытий. Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2007. - 140 с.
13. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей/ Под. ред. А.С. Янюшкина //Братск:ГОУ ВПО»БрГУ»-228 с.

УДК 621.9.047

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭРОЗИОННО-ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*РАХИМЯНОВ Константин Харисович, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: raximyanov@corp.nstu.ru*

*УКРАИНЦЕВА Александра Андреевна, ассистент,
e-mail: ukrainceva.2014@stud.nstu.ru*

*ИВАНОВА Мария Валерьевна, старший преподаватель,
e-mail: m.ivanova.2010@stud.nstu.ru*

Новосибирский государственный технический университет,
630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Аннотация

В данной статье рассматривается получение глубоких отверстий малого диаметра в твердом сплаве ВК8 эрозионно-электрохимической обработкой. Установлено, что эффективность электрохимической размерной обработки как основного механизма удаления материала, определяется скоростью электрохимического растворения. Определена область режимных параметров обработки, ограниченная значениями торцевого межэлектродного зазора, технологического напряжения и гидродинамики потока электролита. Показано, что максимально возможная скорость анодного растворения составляет 13,6 мм/мин.

Ключевые слова: комбинированная обработка, электрохимическая размерная обработка, электроэрозионная обработка, торцевой межэлектродный зазор, вольфрамкобальтовый сплав, формообразование глубоких отверстий малого диаметра.

Введение

С развитием науки и техники происходит непрерывное улучшение, эксплуатационных характеристик материалов, таких как прочность, твердость, ударная вязкость, жаропрочность и стойкость к коррозионным средам, а также повышение производительности и экономичности их обработки [1-3].

Высокие эксплуатационные свойства конструкционных материалов обуславливают определенные затруднения при их обработке, в частности при необходимости получения глубоких отверстий малого диаметра (менее 1 мм), в твердых сплавах.

Необходимо отметить, что обработка сплавов вольфрамкобальтовой группы возможна с применением электрофизикохимических технологий [4]. Сочетание различных механизмов удаления материала и возможность их комбинирования позволяет осуществлять обработку материалов с высокими показателями физико-механических свойств.

Таким образом, перспективным методом получения глубоких отверстий малого диаметра в твердом сплаве ВК8 представляется эрозионно-электрохимическая обработка [5].

Электрохимическая размерная обработка (ЭХРО) заключается в анодном растворении материала при подаче постоянного тока низкого напряжения (5-20 В) на электроды, с присутствием движущейся токопроводящей жидкости – электролита, в межэлектродном зазоре (МЭЗ) [3]. В результате материал превращается в легко удаляемые из зоны обработки химические соединения. Вынос продуктов анодного растворения осуществляется с помощью движущегося потока электролита [5-6]. Основным преимуществом данной обработки является

ся независимость обрабатываемости материалов от их механических и теплофизических свойств.

Недостатком ЭХРО является образование в процессе электрохимического воздействия труднорастворимых пленок на поверхности обрабатываемого материала. Для устранения данных пассивационных пленок, требуется обеспечение дополнительных воздействий, направленных на интенсификацию процесса. Одним из вариантов такого воздействия является введение в процессе обработки электрических разрядов в МЭЗ.

Для оценки влияния каждой составляющей предлагаемой эрозионно-электрохимической обработки необходимо определить их технологические возможности. В связи с тем, что основным механизмом удаления материала является ЭХРО, в первую очередь целесообразно исследовать режимные параметры данного процесса формообразования отверстий малого диаметра в твердом сплаве ВК8.

Описание теоретических или экспериментальных исследований

Выявление расчётных режимных параметров электрохимической размерной обработки проводилось с помощью теоретического расчёта скорости электрохимического растворения, методика которого представлена в работе [6]. На скорость электрохимического растворения существенное влияние оказывают химический состав и параметры электролита, величины технологического напряжения и межэлектродного зазора.

Для определения области режимных параметров обработки твердого сплава ВК8 использовался смешанный электролит 10% NaNO_3 + 10% NaOH [7-9], диапазоны технологического напряжения – 5-20 В и торцевого межэлектродного зазора – 0,025-0,1 мм, при фиксированной скорости потока электролита.

Ограничение торцевого межэлектродного зазора (Δ_T) значением 0,025 мм, необходимо для исключения возникновения облитерации, которая затрудняет движение электролита в зоне обработки [10]. Ограничение максимального значения $\Delta_T = 0,1$ мм межэлектродного торцевого зазора связано с необходимостью обеспечения максимально приближенного соответствия диаметра катода-инструмента диаметру получаемого отверстия.

Как известно, на процесс электрохимической размерной обработки оказывают влияние электрохимические свойства обрабатываемого материала и свойства рабочей среды – электролита [6]. В частности:

- удельная плотность материала;
- электрохимический эквивалент материала;
- удельная электропроводность электролита;
- кинематическая вязкость электролита;
- выход по току.

Для твердого сплава ВК8 удельная плотность составляет $0,01435 \text{ г/см}^3$, а электрохимический эквивалент - $1,11 \text{ г/А}\cdot\text{ч}$. Удельная электропроводность и кинематическая вязкость смешанного электролита 10% NaNO_3 + 10% NaOH составляют $0,0388 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ и $1,245 \text{ мм}^2/\text{с}$, соответственно. Выход по току твердого сплава ВК8 в рассматриваемом электролите имеет значение 0,55.

Результаты и обсуждение

Эффективность электрохимической размерной обработки определяется скоростью электрохимического растворения обрабатываемого материала. Скорость электрохимического растворения определяется по формуле [11]:

$$V_{exp} = \frac{\chi \cdot U \cdot \gamma \cdot \eta}{\Delta_m \cdot \rho \cdot 60}, \quad (1)$$

где, χ – электрохимический эквивалент обрабатываемого материала, [г/А · ч];

U – технологическое напряжение, [В];

γ – удельная электропроводность электролита, [Ом⁻¹ · мм⁻¹];

η – выход по току;

Δ_m – торцевой межэлектродный зазор, [мм];

ρ – плотность обрабатываемого материала, [г/мм³].

В условиях самоустанавливающегося характера ЭХРО скорость анодного растворения материала будет равна подаче относительного движения электродов. Для стабильного протекания процесса электрохимической обработки необходимо удалять продукты анодного растворения материала из торцевого межэлектродного зазора. Это возможно обеспечить движущимся потоком электролита, скорость которого можно определить по эмпирической зависимости [12]:

$$V_{эл} = 4 + 0,6 \cdot S^2, \quad (2)$$

где S – подача катода-инструмента.

Помимо этого, для обеспечения удаления продуктов анодного растворения необходимо учитывать гидродинамические условия течения электролита. Скорость потока электролита определяется его вязкостью, которая влияет на диффузионные и пассивационные процессы в МЭЗ. Поток электролита должен обеспечивать постоянное обновление раствора в зоне обработки, тем самым снимая диффузионные ограничения, а также выносить продукты анодного растворения из МЭЗ.

Гидродинамика электрохимического процесса описывается числом Рейнольдса, которое зависит от скорости потока электролита, вязкости и величины межэлектродного зазора [13]. Для эффективной реализации электрохимической размерной обработки предпочтительно использование переходного режима (граница ламинарного и турбулентного режима) потока электролита в межэлектродном зазоре, которому соответствует значения числа Рейнольдса 2300...4000 [14]. При данном режиме движения электролита в потоке возникают небольшие завихрения жидкости, что способствует более эффективному выносу продуктов электрохимических реакций из зоны обработки.

В связи с этим, скорость потока электролита с учетом его гидродинамических показателей можно рассчитать по формуле [12]:

$$V_{эл} \leq \frac{Re \cdot \nu}{\Delta_m}, \quad (3)$$

где $V_{эл}$ – скорость потока электролита в МЭЗ, [м/с];

Re – число Рейнольдса;

ν – кинематическая вязкость электролита, [м²/с];

Δ_m – торцевой межэлектродный зазор, [м].

Таким образом, можно определить допустимые скорости потока электролита, которые находятся в диапазоне 29-50 м/с.

Дальнейшие расчёты ограничиваются числом Рейнольдса $Re = 2300$ для исключения кавитации, что соответствует скорости течения электролита $V_{эл} = 29$ м/с.

На рисунке 1 представлены результаты расчёта по формулам (1, 2) скорости электрохимического растворения для различных значений торцевого межэлектродного зазора и технологического напряжения, с учетом ограничения, описанного формулой (3).

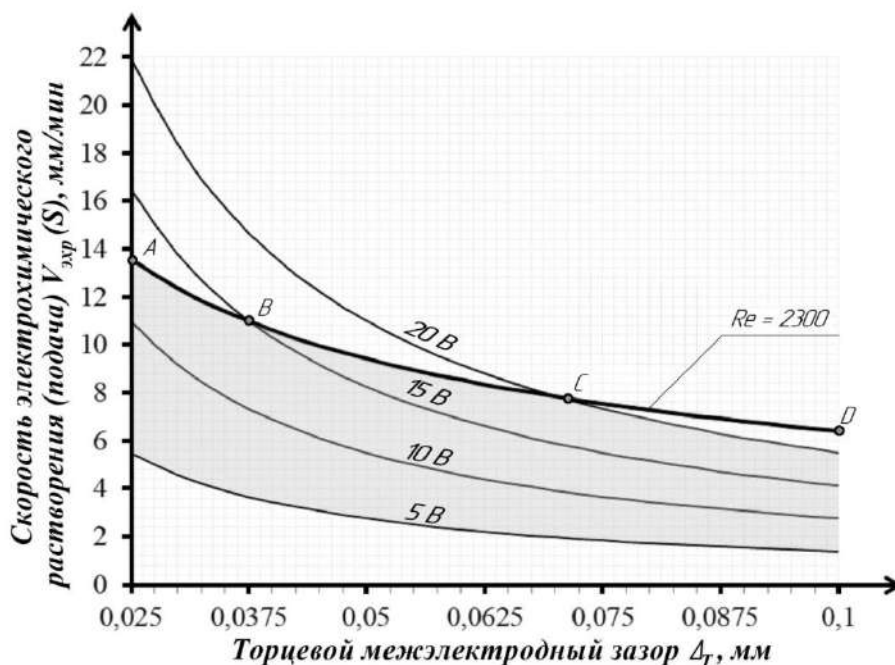


Рисунок 1 – График зависимости линейной скорости электрохимического растворения твердого сплава ВК8 от величины торцевого межэлектродного зазора

Для достижения высокой скорости электрохимического растворения материала необходимо использование максимально возможных значений технологического напряжения и минимально возможных значений торцевого МЭЗ. При этом необходимо учитывать, что при больших значениях скорости анодного растворения требуется своевременное удаление продуктов растворения из зоны обработки. Для этого движение потока электролита через МЭЗ должно осуществляться со скоростью, не превышающей значение, соответствующее начальному этапу турбулентного режима.

Для принятого значения максимальной скорости потока электролита (29 м/с) в МЭЗ, определен диапазон подач электрода-инструмента, соответствующий значениям 6,4-13,6 мм/мин (линия ABCD), при различных величинах МЭЗ, что ограничивает область возможных режимных параметров. При межэлектродном зазоре 0,025 мм напряжение составляет 12,3 В (точка А), при напряжении 15 В торцевой межэлектродный зазор составляет 0,0375 мм (точка В), при напряжении 20 В МЭЗ равен 0,071 мм (точка С). При этом необходимо отметить, что значение напряжения (точка D) для МЭЗ равно 0,1 мм выходит из рассматриваемого диапазона 5 – 20 В. Таким образом, использование напряжений 5 и 10 В позволяет производить электрохимическую обработку в рассматриваемом диапазоне значений торцевого МЭЗ. Значения скорости электрохимического растворения (рис.1) при минимальном торцевом зазоре 0,025 мм и напряжениях 5 и 10 В, составляют 5,5 мм/мин и 11 мм/мин соответственно, а при максимальном торцевом МЭЗ 0,1 мм, составляют 1,4 мм/мин и 2,8 мм/мин соответственно. При технологическом напряжении 15 В область рабочих значений торцевого МЭЗ составляет 0,0375-0,1 мм, а скорость электрохимического растворения 4,1-11 мм/мин. С увеличением технологического напряжения до 20 В, допустимый торцевой МЭЗ составляет

0,071-0,1 мм, при этом скорость электрохимического растворения находится в пределах 5,5-7,7 мм/мин.

Таким образом, максимальное значение скорости электрохимического растворения, обуславливающее эффективность ЭХРО, достигается при минимальном торцевом межэлектродном зазоре 0,025 мм, напряжении 12,3 В и составляет 13,6 мм/мин.

Выводы

На основании теоретических расчетов определены границы режимных параметров электрохимической составляющей комбинированной прошивки отверстий малого диаметра в твердом сплаве ВК8 в смешанном электролите – 10% NaNO_3 + 10% NaOH с учётом гидродинамических ограничений потока электролита.

Было установлено, что область режимных параметров ограничивается не только значениями торцевого межэлектродного зазора и технологического напряжения, но и гидродинамикой потока электролита.

В результате анализа полученных результатов, для достижения максимально возможной скорости электрохимического растворения были определены значения минимального торцевого межэлектродного зазора – 0,025мм и максимально возможного технологического напряжения – 12,3 В.

Список литературы

1. Подураев В. Н. Физико-химические методы обработки / В. Н. Подураев, В. С. Камалов // М., Машиностроение. 1973. – 346 с.
2. Мороз И.И. Электрохимическая размерная обработка металлов. – М.: Машиностроение, 2009. – 279 с.
3. Н.Р. Schulze et al., Simulation of thermal effects for electrical discharge machining, *Nonconventional Technologies Review*, 1, 1 – 3, 2007
4. Маслов А.Р. Обработка труднообрабатываемых материалов резанием: учебное пособие / А.Р. Маслов, А.Г. Схиртладзе – М.: Машиностроение, 2018. – 208 с.
5. Рахимьянов Х. М. Комбинированная прошивка отверстий малого диаметра в твердосплавных деталях = Thecombineddrillingofsmalldiameterholesinhard-alloydetails / Х. М. Рахимьянов, С. И. Василевская, А. А. Украинцева // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2019) = Innovationsinmechanicalengineering (ISPCIME-2019) : сб. тр. 10 междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, Шерегеш, 26–29 нояб. 2019 г. – Кемерово : Изд-во КузГТУ, 2019. – С. 140–144. - 100 экз. - ISBN 978-5-00137-104-5.
6. Украинцева А. А. Изучение возможности электрохимической прошивки отверстий малого диаметра в деталях, выполненных из твердого сплава / А. А. Украинцева, С. И. Василевская, Х. М. Рахимьянов // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 3–7 дек. 2018 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 3. – С. 431-435. - 100 экз. - ISBN 978-5-7782-3733-9, ISBN 978-5-7782-3736-0 (ч. 3).
7. Рахимьянов Х. М. Анодное поведение твердого сплава ВК8 при электрохимическом растворении в нитратно-щелочном электролите / Х. М. Рахимьянов, С. И. Василевская, А. А. Украинцева // Нано- и электрофизикохимическая обработка в машино- и приборостроении : сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф., Тула, 11 дек. 2019 г. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2019. – С. 50–55. - 100 экз. - ISBN 978-5-76794517-7.
8. Гродзинский З.Я. Электролит для электрохимической обработки твердых сплавов / З.Я. Гродзинский, Л.И. Ломоносов – авт. свид. № 313639. – Бюл. изобрет., 1971.

9. Паршутин В.В. Исследование электрохимической обработки твердого сплава ВК8 и его компонентов в нитратно – щелочном электролите. – В сб. – Электрохимическая размерная обработка металлов. – Кишинев: изд-во Штиинца, 1974. – С. 117 – 124.

10. Vasilevskaya S. I. Consideration of hydraulic limitations in setting the mode parameters of combined piercing the holes [Electronic resource] / S. I. Vasilevskaya // MATEC Web of Conferences. - 2019. - Vol. 298 : International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment (ICMTMTE 2019). - Art. 00141 (6 p.) - Mode of access: <https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2019/47/contents/contents.html> . - Title from screen - DOI: 10.1051/mateconf/201929800141.

11. Артамонов Б.А., Вишницкий А.Л., Волков Ю.С., Глазков А.В. Размерная электрическая обработка металлов – М.: Высшая школа, 1978. – 336 с.

12. Черепанов Ю.П., Самецкий Б.И. Электрохимическая обработка в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1972. – 117 с.

13. Рахимьянов Х.М., Василевская С.И. Оценка гидродинамических процессов при электрохимической прошивке отверстий малого диаметра. Высокие, критические электро- и нанотехнологии: Труды Всероссийской научно - технической конференции. Тула, 19 декабря 2017 г. Тула. ТулГУ, 2017. – С. 62 – 74.

14. Емцев Б. Т. Техническая гидромеханика: Учебник для вузов по специальности «Гидравлические машины и средства автоматизики». – М.: Машиностроение, 1987. – 440 с.

DETERMINATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ELECTRODISCHARGE-ELECTROCHEMICAL MACHINING

Rakhimyanov K.Kh., Ph.D. (Engineering), Associate Professor,
e-mail: rakhimyanov@corp.nstu.ru

Ukrainitseva A.A., assistant, e-mail: ukrainitseva.2014@stud.nstu.ru

Ivanova M.V., senior lecturer, e-mail: m.ivanova.2010@stud.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, Faculty of Mechanical Engineering and Technologies, 630073, Prospect K. Marx, 20, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

This article discusses the production of deep holes of small diameter in the WC-8Co hard alloy by electrodischarge-electrochemical machining. It has been established that the efficiency of electrochemical sizing as the main mechanism for material removal is determined by the rate of electrochemical dissolution. The range of processing parameters is determined, limited by the values of the end interelectrode gap, process voltage and hydrodynamics of the electrolyte flow. It is shown that the maximum possible rate of anodic dissolution is 13.6 mm/min.

Keywords: combined machining, electrochemical sizing machining, EDM machining, end interelectrode gap, tungsten-cobalt alloy, machining of small diameter deep holes.

УДК 621.9.047

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА ПРИ ЭРОЗИОННО-ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

*РАХИМЯНОВ Константин Харисович, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: raximyanov@corp.nstu.ru*

*ИВАНОВА Мария Валерьевна, старший преподаватель,
e-mail: m.ivanova.2010@stud.nstu.ru*

*УКРАИНЦЕВА Александра Андреевна, ассистент,
e-mail: ukraineva.2014@stud.nstu.ru*

Новосибирский государственный технический университет,
630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Аннотация

В данной статье рассмотрена система подачи электролита при эрозионно-электрохимической обработке отверстий малого диаметра и глубоких узких пазов. Для переходного режима течения электролита с числом Рейнольдса 2300 проведены расчеты средней скорости потока электролита с учетом вязкости раствора (NaCl , NaNO_3 , Na_2SO_4 , $\text{NaNO}_3+\text{NaOH}$) в диапазоне диаметров катода-инструмента 0,13...0,51 мм. Экспериментально установлены характеристики фильтра, обеспечивающие равномерную подачу электролита в гидравлическую систему.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, эрозионная обработка, электролит, межэлектродный зазор, труднообрабатываемые материалы, анодное растворение.

Введение

В настоящее время возникает необходимость в изделиях, выполненных из труднообрабатываемых металлов и сплавов, конструкции которых предусматривают наличие отверстий малого диаметра (менее 1 мм) и глубоких узких пазов (с соотношением глубины к ширине более 10). Поверхности такого размерного диапазона используются во многих отраслях промышленности таких как, приборостроение, ракетостроение, медицина и т.д. При этом вопрос их обработки остается открытым. Так зависимость лезвийных методов обработки от механических свойств обрабатываемых материалов делает невозможным их применение для получения указанных поверхностей. В связи с этим поиск пригодных способов формообразования необходимо осуществлять в области комбинированных физико-химических методов.

В практике для формообразования поверхностей в труднообрабатываемых материалах применяется электрохимическая размерная обработка (ЭХРО). Стоит отметить, что преимуществом ЭХРО является независимость её от механических свойств обрабатываемых материалов. При этом определение и расчет показателей технологических режимов ЭХРО представляет собой сложную задачу, которая зависит, как от физико-химических параметров процесса формообразования, так и от гидродинамики электролита. Как известно одним из главных показателей эффективности формообразования является производительность обработки, которая определяется скоростью электрохимического растворения обрабатываемого материала [1, 2]. Стоит отметить, что при ЭХРО возникает ряд ограничений, снижающих ее производительность. Пассивационные ограничения возникают как следствие электрохимических реакций в МЭЗ вблизи поверхностей электродов (катода и анода) и выражается в об-

разовании на поверхности заготовки оксидных пленок с пониженной удельной электрической проводимостью. Диффузионные ограничения в электролите возникают в связи с накоплением в электролите продуктов электролиза (шлама), которые снижают уровень активных ионов в прианодном слое. Для устранения отмеченных ограничений существуют различные методы. Одним из таких методов интенсификации ЭХРО является подача в МЭЗ высоковольтных импульсов энергии (разряда), реализуемых при электроэрозионной обработке. Стоит отметить, что превалирующим механизмом удаления материала данной комбинированной обработки является электрохимическое растворение, а эрозионное воздействие применяется для интенсификации процесса. Как показано в работах [3-6] эффективность ЭХРО в значительной степени определяется параметрами рабочей среды и гидродинамическими условиями обработки. Данная работа посвящена изучению влияния гидродинамики электролита с учетом особенностей геометрии обрабатываемых поверхностей при электрохимической обработке.

Описание теоретических или экспериментальных исследований

Для формообразования глубоких поверхностей малых размеров необходимо выбрать наиболее подходящую схему формообразования. На рисунке 1 представлены схемы формообразования отверстия (1а) и паза (1б), где h – глубина отверстия/паза, l – длина паза.

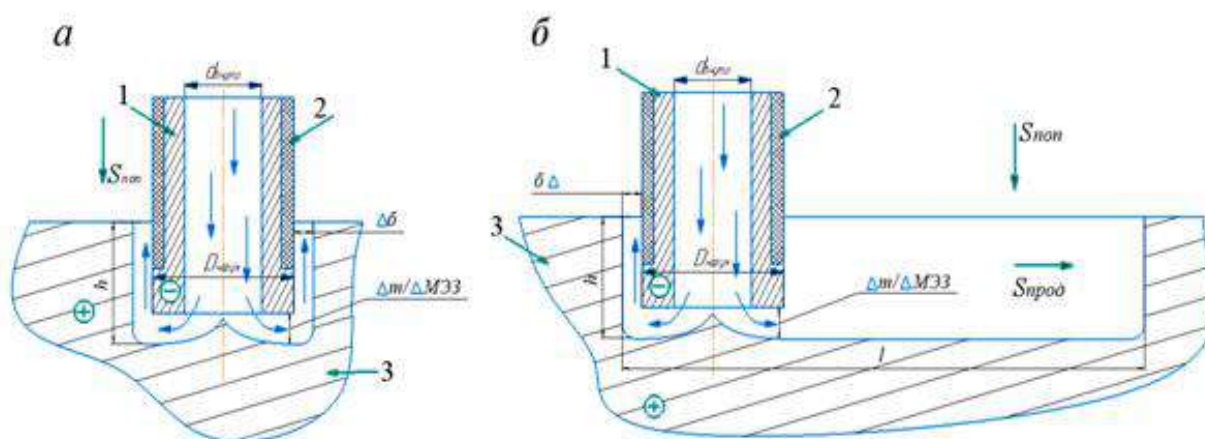


Рисунок 1 – Схема формообразования
а – отверстий, б – пазов:
1 – катод; 2 – изоляционный слой; 3 – анод

Для реализации любой из схем обработки необходимо учитывать, что подача электролита в зону между электродами должна осуществляться равномерно, обеспечивая тем самым стабильность процесса электрохимического растворения заготовки. Скорость течения электролита и скорость протекания электрохимических процессов зависит от давления в системе. В работах [3-6] описано влияние гидродинамических параметров на производительность анодного растворения. Так движение электролита в гидравлической системе характеризуется расходом жидкости ($Q_{эл}$, $м^3/с$), средней скоростью потока (V , $м/с$) через площадь выходного отверстия (S , $м^2$), числом Рейнольдса (Re), пропускной способностью фильтрующей сетки ($Q_{ф}$, $м^3/с$ через $S_{ф}$, $м^2$). Гидравлическая схема подачи электролита представлена на рисунке 2.

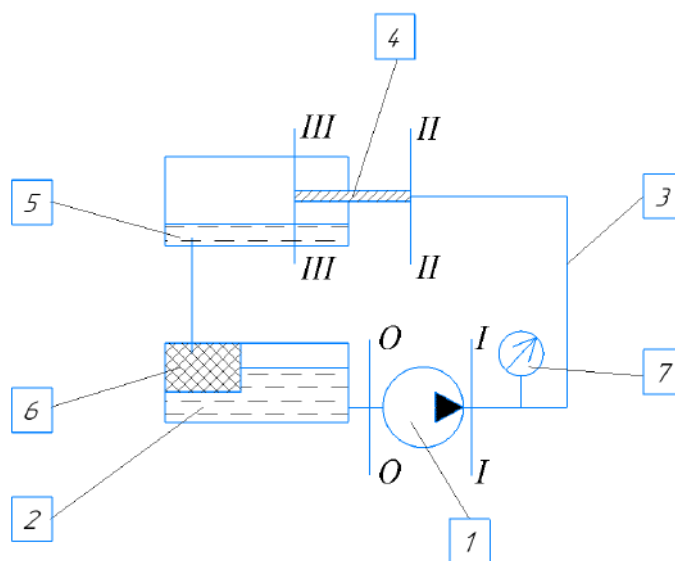


Рисунок 2 – Гидравлическая схема подачи электролита:
 1 – насос; 2 – бак; 3 – патрубок; 4 – катод-инструмент; 5 – ячейка; 6 – фильтр;
 7 – манометр; 0-0; I-I; II-II; III-III – сечение

Раствор электролита подается в патрубок 3 из бака 2 с помощью насоса 1. Далее электролит проходит через катод-инструмент 4, рабочую зону ячейки 5, фильтр 6 и попадает обратно в бак 2. Давление в системе контролируется манометром 7, который расположен на нагнетательном патрубке насоса 1. Так как насос 1 обеспечивает постоянное давление в гидравлической системе подачи электролита, то движение раствора в ней можно считать установившимся [7, 8]. В связи с этим в любом сечении гидравлической системы (рисунок 2) расход электролита определяется средней скоростью его потока. Так как данные параметры связаны между собой зависимостью [7]:

$$Q_i = V_i \cdot S_{i-i} , \quad (1)$$

где Q_i – расход электролита, [м³/с]; V_i – средняя скорость потока, [м/с]; S_{i-i} – площадь сечения $i-i$, [м²], то уравнение постоянства расхода потока жидкости

$$Q_{0-0} = Q_{I-I} = Q_{II-II} = Q_{III-III} = const , \quad (2)$$

можно записать в виде

$$V_0 \cdot S_{0-0} = V_I \cdot S_{I-I} = V_{II} \cdot S_{II-II} = V_{III} \cdot S_{III-III} , \quad (3)$$

Для расчета расхода электролита по формуле (1) необходимо определиться с площадью сечения потока. Так как в системе подачи электролита действует уравнение непрерывности потока и постоянства расхода, то для определения расхода раствора достаточно учесть объем электролита, проходящий через площадь сечения III-III, то есть выходного отверстия катода за единицу времени [7].

В качестве катода-инструмента используются полые иглы круглого сечения с внутренним диаметром 0,13...0,51 мм. При этом площадь выходного отверстия составила 0,0169·10⁻⁶...0,2601·10⁻⁶ м². Кроме того необходимо определить среднюю скорость потока,

которая рассчитывается исходя из режима течения электролита – ламинарного, переходного и турбулентного.

В работах [6-11] отмечаются преимущества применения переходного режима течения раствора при электрохимическом растворении, так как при этом режиме обеспечивается значительное снижение диффузионных и пассивационных ограничений. Поток электролита в трубе круглого сечения переходного режима характеризуется числом Рейнольдса находящимся в диапазоне от 2300 до 4000 [8]. При выборе конкретного значения числа Рейнольдса необходимо принимать во внимание, что с его повышением увеличивается вероятность возникновения кавитационных явлений в потоке электролита, что негативно сказывается на стабильности процесса ЭХРО.

Значение средней скорости течения электролита для переходного режима может быть определено по формуле [7]:

$$V = \frac{Re \cdot \nu}{d_{внутр}}, \quad (4)$$

где V – средняя скорость потока, [м/с]; Re – значение числа Рейнольдса для труб круглого сечения; $d_{внутр}$ – внутренний диаметр катода-инструмента круглого сечения, [м]; ν – кинематическая вязкость электролита, [м²/с].

Кинематическая вязкость (ν , м²/с) электролита зависит от химического состава раствора. Анализ литературных источников показал, что в практике электрохимии чаще всего применяются водные нейтральные растворы солей (NaCl, NaNO₃, Na₂SO₄), а также смесь их со щелочными растворами (NaNO₃+NaOH). В таблице 1 представлены величины кинематической вязкости для рассматриваемых составов электролитов при 10 % концентрации.

Таблица 1 – Кинематическая вязкость 10 % раствора электролита [12]

$\nu, \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$			
NaCl	NaNO ₃	Na ₂ SO ₄	NaNO ₃ +NaOH
1,11	1,02	1,26	1,25

Средняя скорость потока электролита (например, Na₂SO₄) для внутреннего диаметра катода-инструмента ($d_{внутр} = 0,13 \cdot 10^{-3}$ м) при $Re = 2300$ составит по формуле (4):

$$V = \frac{2300 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6}}{0,13 \cdot 10^{-3}} = 22,29 \text{ м/с.}$$

Результаты расчетов средней скорости электролитов с 10 % концентрацией при различных значениях внутренних диаметров катодов-инструментов представлены на рисунке 3.

Анализ полученных данных свидетельствует, что область значений средней скорости потока электролита в зависимости от вязкости раствора при различных значениях внутренних диаметров катодов-инструментов варьируется между средними скоростями раствора Na₂SO₄ и NaNO₃. Для минимального и максимального внутреннего диаметра (0,13 мм и 0,51 мм) величины средней скорости электролита 10% Na₂SO₄ равны 22,30 м/с и 5,68 м/с, а для 10% NaNO₃ – 18,05 м/с и 4,87 м/с. Необходимо отметить, что при наибольшем диаметре катода-инструмента разница между средними скоростями потока электролита Na₂SO₄ и NaNO₃ составляет 0,81 м/с, а при наименьшем – 4,25 м/с.

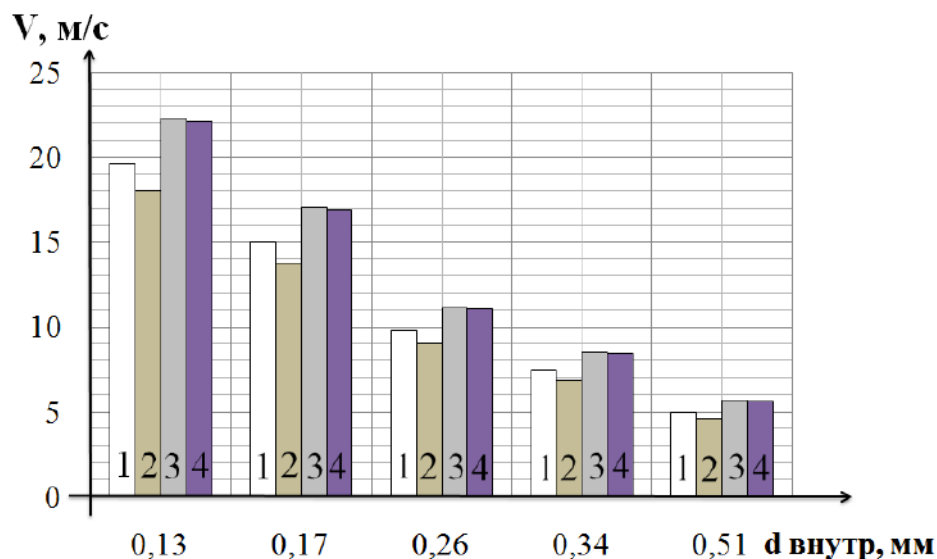


Рисунок 3 – График зависимости средней скорости потока электролитов с 10 % концентрацией при различных значениях внутренних диаметров катодов-инструментов при $Re = 2300$, $P = 0,3 \dots 1,0$ МПа: 1 – NaCl; 2 – NaNO₃; 3 – Na₂SO₄; 4 – NaNO₃+NaOH

В работах [1 – 6] показано, что для обеспечения стабильного протекания процесса электрохимического растворения величину расхода электролита в МЭЗ необходимо установить с учетом вязкости раствора. Расход электролита может быть определен по формуле [7]:

$$Q_3 = V \cdot \frac{\pi \cdot d_{внутр}^2}{4} \quad (5)$$

Подставляя значение диаметра внутреннего отверстия катода-инструмента $d_{внутр} = 0,13 \cdot 10^{-3}$ м для раствора Na₂SO₄ получим:

$$Q_3 = 22,29 \cdot \frac{3,14 \cdot (0,13 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 29,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Результаты расчетов расхода рассматриваемых электролитов представлены на рисунке 4.

Полученные результаты, представленные на рисунке 4, свидетельствуют о том, что для граничных значений внутренних диаметров катода-инструмента величины расхода электролита 10% Na₂SO₄ составили $29,5 \cdot 10^{-8}$ и $116,0 \cdot 10^{-8}$ м³/с. Для внутреннего диаметра 0,17 мм расход раствора составил $38,7 \cdot 10^{-8}$ м³/с, для 0,26 мм – $59,1 \cdot 10^{-8}$ м³/с, для 0,34 мм – $77,3 \cdot 10^{-8}$ м³/с. Областью допустимых значений минимального расхода электролита (10% NaNO₃) являются значения при минимальном и максимальном внутреннем диаметре, равные 23,9 м³/с и 93,9 м³/с. Отметим, что значения расхода электролитов (NaCl, NaNO₃, Na₂SO₄, NaNO₃+NaOH) имеют один порядок, так как величины кинематической вязкости растворов имеют близкие значения (см. табл. 1).

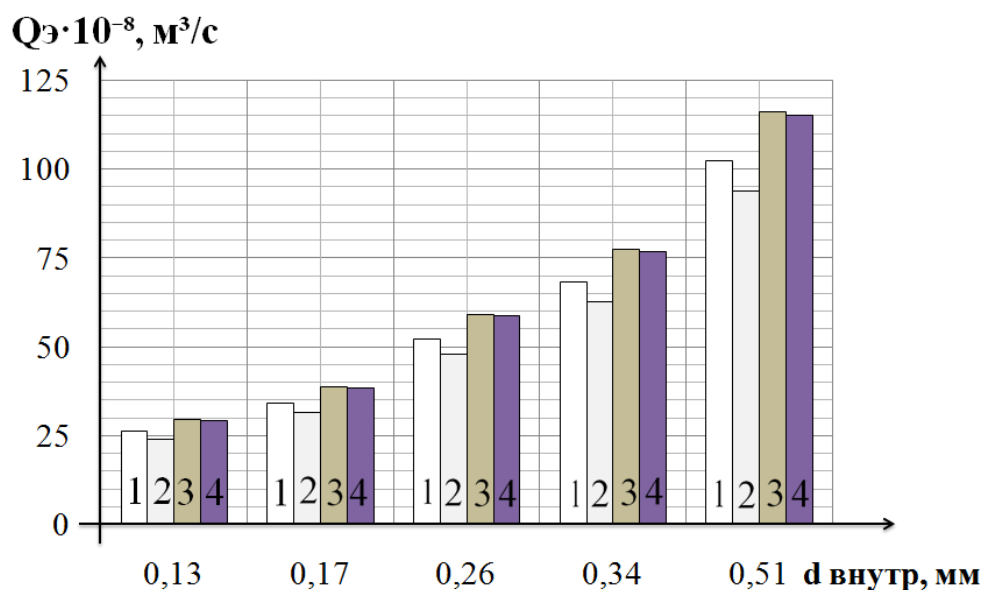


Рисунок 4 – График зависимости расхода электролита от внутреннего диаметра катода-инструмента при $Re = 2300$, $P = 0,3...1,0$ МПа: 1 – NaCl; 2 – NaNO₃; 3 – Na₂SO₄; 4 – NaNO₃+NaOH

Необходимо отметить, что с течением времени в растворе будут накапливаться продукты химических реакций, снижающие эффективность обработки. В связи с этим необходимо подобрать фильтр, имеющий пропускную способность больше величины расхода электролита, соответствующего максимальному внутреннему диаметру катода-инструмента. Главным параметром фильтра является размер сетки, и расход объема жидкости в единицу времени. Для подбора фильтрующего элемента были проведены экспериментальные исследования зависимости расхода электролита объемом 0,001 м³ через фильтр с тонкостью фильтрования 20 мкм, 40 мкм, 70 мкм и 100 мкм (площадь фильтрации $25 \cdot 10^{-3}$ м²) в единицу времени (таблица 2). В качестве электролита использовался, раствор 10 % Na₂SO₄, имеющий наибольшую вязкость среди рассматриваемых электролитов.

Таблица 2 – Расход электролита через фильтр с течением времени в системе подачи электролита

Размер сетки фильтра, мкм				
	20	40	70	100
t, с	596	210	47	16
$Q_e \cdot 10^{-8}, \text{ м}^3/\text{с}$	145	605	2912	8947

В результате эксперимента установлено, что при одном и том же объеме жидкости время фильтрации уменьшается с повышением размера фильтровальной сетки. Это говорит о том, что размер сетки фильтра и количество ячеек на площади фильтрации значительно влияет на расход жидкости. Анализ полученных значений расхода электролита показал, что даже при минимальной тонкости фильтрования (20 мкм) объем фильтрованного электролита ($145 \cdot 10^{-8}$ м³/с) выше, чем величина расхода жидкости ($116 \cdot 10^{-8}$ м³/с) через отверстие катода-инструмента максимального диаметра (0,51 мм).

Для лучшей очистки электролита необходимо применять фильтр с наименьшим размером сетки из рассмотренных вариантов фильтра. В связи с этим предпочтительно использовать фильтр (20 мкм), который обеспечивает равномерную подачу электролита во всем диапазоне рассматриваемых в данной работе катодов-инструментов.

Выводы

При ЭХРО необходимо создание таких гидродинамических условий, при которых осуществляется полный, и своевременный вынос продуктов электрохимических реакций из межэлектродного зазора, и снижение диффузионных и пассивационных ограничений. Данные условия в гидравлической системе подачи электролита в выбранном диапазоне размеров катода-инструмента с выходным отверстием круглого сечения (0,13...0,51 мм) обеспечиваются созданием переходного режима течения электролита и фильтрующим элементом с необходимой тонкостью фильтрования. Фильтр с наименьшим размером сетки (20 мкм), из рассмотренных вариантов фильтра, обеспечит электролит более высоким качеством очистки раствора.

Список литературы

1. G. Mayank, Ch. Fuchen, K. Masanori, Analysis of Reactions determining current efficiency in electrochemical machining, *Procedia CIRP*, Vol. 68. pp. 511-516 (2018)
2. Выбор электролита для электрохимической обработки быстрорежущей стали P12Ф3К10М3 = The choice of electrolyte for electrochemical processing of quick cutting steels R12F3K10M3 / В. В. Янпольский, М. В. Иванова, Р. М. Кадырбаев, А. В. Журавлева // Инновации в машиностроении (ИнМаш–2017) = Innovations in mechanical engineering (ISPCIME–2017) : сб. тр. 8 междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 28–30 сент. 2017 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – С. 95-99.
3. T. Keerthivasan, P. Kaushik, P. Mirunalini, J. Surendhiran, Design and analysis of erosion in electrochemical machining tool, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 37. pp. 182-186 (2021)
4. Боровский Г.В. Современные технологии обработки материалов / Г.В. Боровский, С.Н. Григорьев, А.Р. Маслов – Машиностроение, 2015. – 306 с.
5. Лазаренко Б.Р. Прохождение электрического тока через электролиты / Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко // *Электронная обработка материалов*. 1978. № 1. – с. 5 – 9.
6. Смоленцев Е.В. Проектирование технологического процесса электроэрозионно-химической обработки // *Металлообработка*. 2008. № 6 (48). – с. 34 – 39.
7. Вихарев А.Н., Долгова И.И. Гидравлика. Режимы движения, уравнение Бернулли, потери напора, каналы: Учебное пособие. - Архангельск: Изд-во АГТУ, 2001.-92 с.
8. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика: Учебник для вузов по специальности «Гидравлические машины и средства автоматизации». - М.: Машиностроение, 1987. – 440 с.
9. Смоленцев В.П. Проектирование технологических процессов комбинированной обработки в реологических жидкостях / В.П. Смоленцев, А.А. Козлов, Н.В. Пишкова // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2013. – 5 с.
10. Авторское свидетельство SU 1634408 A1 B23H 3/08, B23H 5/12. Электролит для электроэрозионно-химической прошивки отверстий в деталях из титановых сплавов / В. А. Бородулин, В. И. Волков, В. М. Бурков, Е. М. Румянцев - № 4358483; заявл. 04.01.1988; опубл. 15.03.1991. – 2 с.
11. Овчинников Д.В. Инновационный потенциал технологий комбинированной электроэрозионно-электрохимической обработки материалов / Д.В. Овчинников, Ю.А. Моргунов, С.А. Тучак // XXX МЕЖДУНАРОДНАЯ ИННОВАЦИОННАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МО-

ЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СТУДЕНТОВ (МИКМУС - 2018) Сборник трудов конференции. 2019. – с. 637 – 640

12. Вишницкий, А.Л. Электрохимическая и электромеханическая обработка металлов / А.Л. Вишницкий, И.З. Ясногородский, И.П. Григорчук – Л.: Машиностроение. 1971. – 212 с.

CALCULATION OF THE ELECTROLYTE FLOW PARAMETERS OF ELECTRODISCHARGE-ELECTROCHEMICAL MACHINING

Rakhimyanov K. Kh., Ph.D. (Engineering), Associate Professor,
e-mail: raximyanov@corp.nstu.ru

Ukrainceva A. A., assistant, e-mail: ukrainceva.2014@stud.nstu.ru

Ivanova M.V., senior lecturer, e-mail: m.ivanova.2010@stud.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, Faculty of Mechanical Engineering and Technologies,
630073, Prospect K. Marx, 20, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

This article discusses the electrolyte supply system for electrodischarge-electrochemical machining of small-diameter holes and deep narrow grooves. For a transient electrolyte flow regime with a Reynolds number of 2300, the average electrolyte flow rate was calculated taking into account the solution viscosity (NaCl, NaNO₃, Na₂SO₄, NaNO₃ + NaOH) in the range of tool cathode diameters 0.13 ... 0.51 mm. The filter characteristics have been experimentally established to ensure a uniform supply of electrolyte to the hydraulic system.

Keywords: electrolytic machining, EDM machining, electrolyte, electrode gap, difficult-to-machine material, anodic dissolution.

СЕКЦИЯ 2

*Новые
материалы и
способы их
конструирования.
Управление
свойствами
материалов в
процессах
производства и
эксплуатации*

SECTION 2

*New materials
and methods of
material design.
Material
properties control
in production
and operation
processes*

УДК 621.791.05:620.179

МИКРОСТРУКТУРА, АКУСТИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ НАПЛАВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*АБАБКОВ Николай Викторович, канд. техн. наук, доцент,
e-mail: n.ababkov@rambler.ru*

*ПИМОНОВ Максим Владимирович, ст. преп.,
e-mail: pimonovmv@kuzstu.ru*

*ЛЕВАШОВА Елена Евгеньевна, ст. преп.,
e-mail: petrova-lena-petrova2010@ya.ru*

ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева», 650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Аннотация

В публикации представлены результаты исследования микроструктуры, твердости и акустических характеристик наплавленного слоя металла после механической обработки резанием по различным режимам. Выявлено, что увеличение толщины срезаемого слоя приводит возрастанию размера зерна в поверхностном слое, а это отрицательно сказывается на механических характеристиках, таких как предел текучести и твердость. Показаны зависимости показателей неразрушающего контроля и толщины срезаемого слоя.

Ключевые слова: механическая обработка; конструкционная сталь; механические свойства, микроструктура, твердость, акустические характеристики.

Введение

В современном машиностроении всё более актуальным вопросом становится увеличение срока службы деталей машин и узлов различных агрегатов, повышение их долговечности и надежности. Простой оборудования связанные с заменой деталей приводит к существенным материальным потерям на предприятиях горнодобывающей, энергетической и металлургической промышленности. Нестабильная экономическая ситуация, а так же вводимые санкции приводят к периодическим срывам сроков поставок новых деталей и простою техники, в таких условиях наиболее эффективным способом избежать потерь, является реновация изношенных деталей различными методами, такими как сварка, наплавка, нанесение покрытий и т.д.

Реновация деталей позволяет сократить:

- затраты на закупку новых деталей, за счёт экономии металла, топливно-энергетических и других природных ресурсов на полный цикл её изготовления.
- время простоя машин и агрегатов, за счёт уменьшения времени доставки новых деталей;
- увеличить срок службы деталей машин и узлов агрегатов, так как возможно создать поверхностный слой металла с большим спектром требуемых характеристик [1, 2].

Современные способы наплавки и обработки, применяемые при восстановлении изношенных деталей должны обладать следующими свойствами:

- максимальной универсальностью;

- обеспечивать технические характеристики и ресурс восстановленных деталей не ниже требований технических условий на новую деталь;
- иметь высокую производительность и технологическую устойчивость;
- базироваться на недорогом и доступном оборудовании;
- использовать имеющиеся на рынке материалы;
- обладать высокой экологичностью [3].

Процесс механической обработки резанием сопровождается интенсивной пластической деформацией и изменением термомеханического состояния поверхностных слоёв, что ведет к изменению их структурного и фазового состава и сопровождается появлением системы остаточных напряжений.

Микроскопические методы дают возможность определить размеры и форму кристаллов, наличие различных по своей форме кристаллов, их распределение и относительные объемные количества, форму инородных включений и микропустот и др. Величина зерна поликристаллических материалов является одной из важных характеристик структуры и определяет большинство физико-механических свойств материалов [4, 5].

Учитывая вышесказанное, актуальным направлением является изучение влияния механической обработки наплавленного слоя на свойства и структуру материала.

Материалы и экспериментальные процедуры

В качестве исследуемого материала принята конструкционная низколегированная сталь 09Г2С. На образцы производилась наплавка плавящимся электродом в защитном газе, режимы наплавки - сварочный ток 320 А, напряжение 23 В, скорость 18-25 м/ч, проволока Св-08Г2С диаметром 1,6 мм.

Эксперимент был проведен в соответствии с режимами обработки приведёнными в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы обработки фрезерованием

	№ 1 «черновая»	№ 2 «получистовая»	№ 3 «чистовая»
Толщина заготовки, мм	10	10	10
Глубина резания t , мм	0,5	1	2
Подача, s , мм/об	0,32	0,4	0,32
Кол-во оборотов, n , об/ мин	640	780	520
Скорость резания V , м/мин	70,2	99,3	136,2

Для исследования структуры металла наплавленных слоев применялся металлографический микроскоп Метам РВ-21-2 [6]. Микроскоп металлографический агрегатный серии ЕС МЕТАМ РВ предназначен для визуального наблюдения микроструктуры металлов, сплавов и других непрозрачных объектов в отраженном свете при прямом освещении в светлом и темном поле, а также для исследования объектов в поляризованном свете и методом дифференциально-интерференционного контраста [7]. Измерения твердости по методу Виккерса проводились на универсальном твердомере Duravision-30.

На образцах проводились также испытания неразрушающими методами: спектрально-акустический (измерительно-вычислительный комплекс «АСТРОН» [8]). При этом

определялись такие характеристики, как время задержки и скорость поверхностных акустических волн, коэффициент затухания, размах амплитуды принятого сигнала.

Результаты и обсуждение

Результаты измерения акустических характеристик, полученные с образца №1 приняты за исходное состояние металла. Поэтому сравнение производим с результатами именно этого образца.

Для образца №2, срезанного фрезерованием слоя в 1 мм, характерны более низкие значения времени задержки поверхностной акустической волны и коэффициента затухания, а также более высокие значения амплитуды. Значения коэффициента затухания имеют более значительное увеличение по сравнению с образцом №1, значения амплитуды принятого импульса волны Релея меньше. Стабильность значений акустических характеристик свидетельствует об отсутствии в металле дефектов [9–16]. Однако их различие для образцов №1 и 2 говорит о том, что в структуре металла этих образцов имеются различия.

Для образца №3, наблюдается увеличение времени задержки волны Релея по сравнению с образцом №1 – на 20 нс, что объясняется большим срезанным слоем.

По результатам измерений был построен графики зависимости времени задержки волн Релея, коэффициента затухания и амплитуды по поверхности от минимального фрезерованного среза до максимального (рис. 1, а и б).

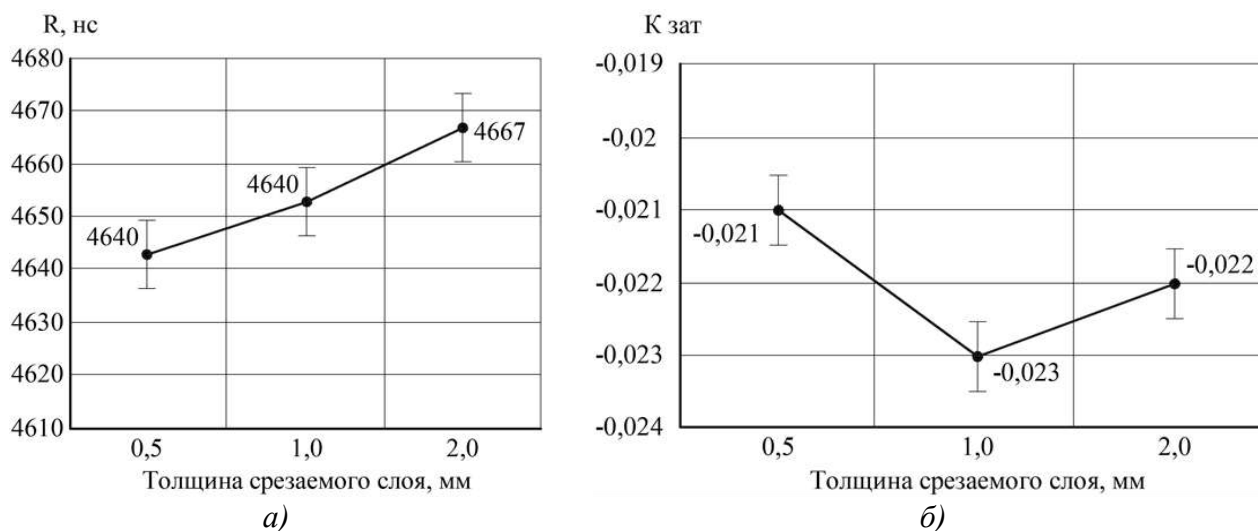


Рисунок 1 – Графики зависимостей от толщины срезанного слоя:
а – времени задержки волн Релея; б – коэффициента затухания

Таким образом, спектрально-акустический метод контроля может применяться при контроле наплавки после механической обработки.

Результаты твердости показали, что, чем меньше фрезеровка наплавленного слоя, тем выше твердость (рис. 2).

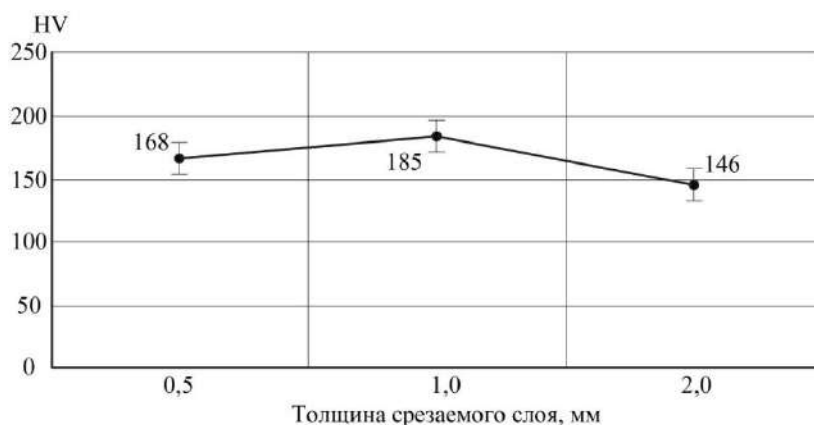
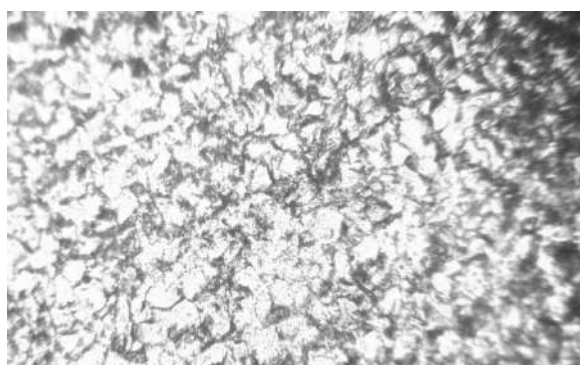


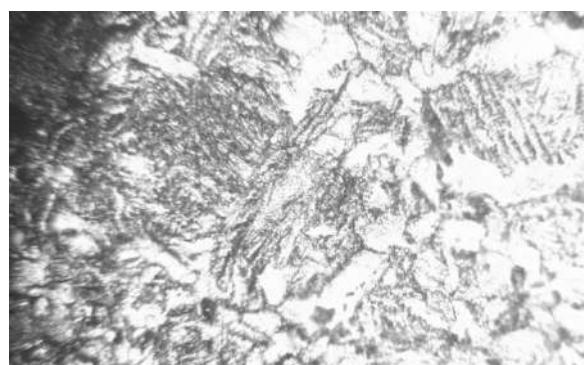
Рисунок 2 – График зависимости среднего значения твердости от толщины срезаемого слоя наплавленного металла

Исследование микроструктуры механически обработанного наплавленного слоя из низколегированной сварочной проволоки Св-08Г2С позволяет получить представление о механических свойствах материала. Результаты исследования помогут подобрать оптимальные режимы механической обработки.

Основной металл низколегированной стали 09Г2С имеет феррито-перлитную микроструктуру, полосчатую, мелкозернистую, с баллом зерна 9–10, перлит пластинчатый (рис. 3, а).



а)



б)

Рисунок 3 – Микроструктура низколегированной стали 09Г2С, $\times 1000$:
а – основной металл; б – зона сплавления наплавленного и основного металла

Зона сплавления наплавленного низколегированной сварочной проволокой Св-08Г2С и основного металла 09Г2С имеет крупнозернистое зерно с ферритной оторочкой с мелкоигльчатый образованием внутри зерна (рис.3, б).

Для исследования механических свойств наплавленного слоя после фрезеровки был измерена величина зерен. На рис. 4, а–в показаны результаты измерений величины зерна на каждом образце.

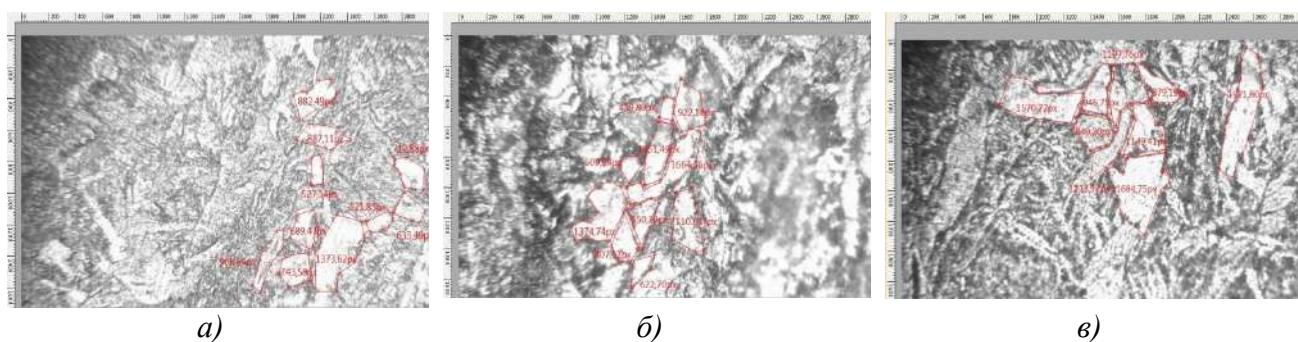


Рисунок 4 – Результаты измерений величины зерна:
а – на образце №1; б – на образце №2; в – на образце №3

Среднее значение размера зерна приведено в таблице 2.

Таблица 2

№ образца	Средний размер зерна, мкм
1	5,94
2	6,72
3	7,67

Для оценки влияния величины зерна на предел текучести (σ_T) и твердости (HV) материалов применяется соотношение Холла-Петча [16].

$$\sigma_T(HV) = \sigma_0(H_0) + \frac{k}{\sqrt{D}}, \quad (1)$$

где σ_T – предел текучести, HV – твердость материала, σ_0 – внутреннее напряжение, препятствующее распространению пластического сдвига в теле зерна, k – коэффициент пропорциональности, D – размер зерна.

Результаты вычисления предела текучести и график зависимости значения предела текучести от величины зерна наплавленного металла приведен на рис. 5.

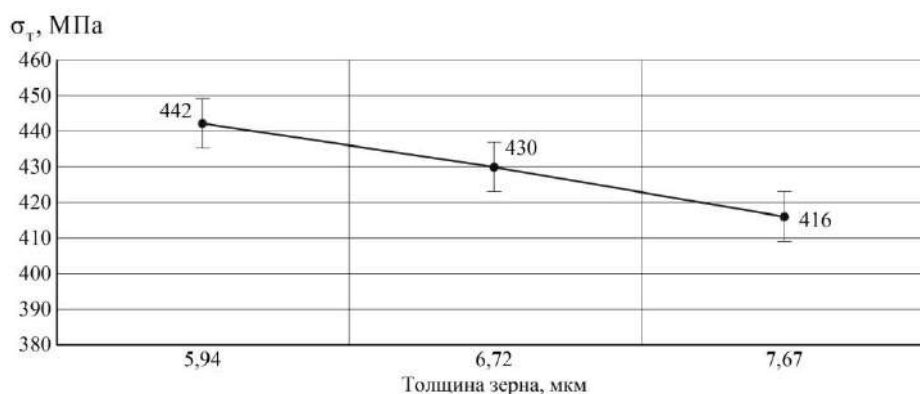


Рисунок 5 – График зависимости значения предела текучести от величины зерна наплавленного металла

Таким образом установлено, что с увеличением глубины и скорости резания происходит рост зерна, что негативно сказывается на механических свойствах материала таких как твердость и предел текучести.

Выводы

Выполнены исследования металла фрагментов образцов неразрушающими методами контроля. В результате которых установлено, что толщина срезаемого слоя имеет линейную зависимость с временем задержки волн Релея, средняя амплитуда находится в пределах погрешности.

При исследовании микроструктуры было выявлено, что с увеличением глубины и скорости резания происходит увеличение размера зерна, что негативно сказывается на механических свойства материала, таких как твердость и предел текучести.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для поддержки молодых кандидатов наук МК-1084.2020.8.

Список литературы

1. Коротков, В. А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями / В. А. Коротков, А. А. Бердников, И. А. Толстов. - Челябинск: Металл, 1993. - 144 с.
2. Лахтин, Ю. М., Леонтьева, В. П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. - 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. –528 с.
3. Шехтер, С. Я., Резницкий, А. М. Наплавка металлов. - М.: Машиностроение 1982. – 71 с.
4. Сафонов, Е. Н. Поверхностное упрочнение железоуглеродистых сплавов дуговой закалкой / Е. Н. Сафонов, В. И. Журавлев // Сварочное производство. - 1997. - № 10. - С. 30-32.
5. Апасов, А.М. Методы исследования, испытания, анализа и контроля в металлургии и материаловедении / А. М. Апасов, Г. В. Галевский– Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 488 с.
6. Беккерт, М. Справочник по металлографическому травлению / Беккерт М., Клемм Х., Лейпциг, 1976: пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979. – 336 с.
7. Смирнов, А. Н. Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 1. Микроскопия и рентгеноструктурный анализ / А. Н. Смирнов, Э. В. Козлов, Н. В. Абабков и др. // Вестник КузГТУ. – 2010. – №4. – С.62–68.
8. Абабков, Н. В. 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. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. - № 5. - С. 101-106.
9. Смирнов, А.Н. Влияние степени деформации сварных соединений углеродистых сталей на структурно-фазовое состояние и поля внутренних напряжений/ А. Н. Смирнов, Э. В. Козлов, Е. А. Ожиганов и др. // Сварка и диагностика. 2016. – № 3. – С. 25–28.
10. Смирнов, А. Н. Акустические и физико-механические показатели теплоустойчивой стали в окрестности трещины / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, А. С. Глинка и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №10. – С. 40–45.
11. Иванов, Ю. Ф. Объемная и поверхностная закалка конструкционной стали – морфологический анализ структуры / Ю. Ф. Иванов, Э. В. Козлов // Изв. вузов. Физика. – 2002. – №3. – С.5-23.
12. Влияние способа упрочнения поверхности деталей на акустические характеристики / Е. Е. Левашова, Н. В. Абабков, М. В. Пимонов // Инновации в

машиностроении. Сборник трудов X Международной научно-практической конференция. Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. 2019. С. 603-606.

13. Механические и акустические характеристики наплавленного и основного металла деталей машин карьерного транспорта / А. Н. Смирнов, В. Л. Князьков, Е. Е. Левашова, Н. В. Абабков, М. В. Пимонов // В сборнике: Структура. Напряжения. Диагностика. Ресурс. сборник научных трудов, посвященный 70-летию доктора технических наук, профессора А. Н. Смирнова. Кемерово, 2017. С. 88-103.

14. Смирнов, А. Н. Градиентные структуры при обработке металлов резанием / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, Э. В. Козлов и др. - Кемерово: ООО «Сибирская издательская группа», 2013. - 179 с.

15. Исследование структуры поверхностного слоя стали 40X после черновой и получистовой механической обработки резанием / М. В. Пимонов, Д. А. Романов, Х. Чен // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. № 2. С. 102-112.

16. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости. - М.: Машиностроение, 1979. - 191 с. с.

MICROSTRUCTURE, ACOUSTIC AND MAGNETIC CHARACTERISTICS OF THE SURFACE LAYER OF SAMPLES AFTER SURFACING AND MACHINING

Ababkov N.V., C.Sc. (Engineering), Assistant professor, e-mail: n.ababkov@rambler.ru

Pimonov M.V., Senior teacher, e-mail: pimonovmv@kuzstu.ru

Levasova E.E., Senior teacher, e-mail: petrova-lena-petrova2010@ya.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyay ast., Kemerovo, 650000, Russia

Abstract

The publication presents the results of a study of the microstructure, hardness and acoustic characteristics of the deposited metal layer after machining by cutting in various modes. It was found that an increase in the thickness of the cut layer leads to an increase in the grain size in the surface layer, and this negatively affects the mechanical characteristics, such as yield strength and hardness. Differences in non-destructive testing and the thickness of the cut layer.

Keywords: mechanical processing; structural steel; mechanical properties, microstructure, hardness, acoustic characteristics.

УДК 621.791.05:620.179

**КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ СТРУКТУРЫ, МЕХАНИЧЕСКИМИ
СВОЙСТВАМИ И АКУСТИЧЕСКИМИ И МАГНИТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
В ЗОНАХ УСТОЙЧИВОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ И ТЕПЛОУСТОЙЧИВОЙ СТАЛЕЙ**

*АБАБКОВ Николай Викторович, канд. техн. наук, доцент,
e-mail: n.ababkov@rambler.ru*

СМИРНОВ Александр Николаевич, доктор техн. наук, профессор

ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева», 650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Аннотация

Результаты анализа микроструктуры, механических свойств, акустических и магнитных характеристик металла длительно работающего энергетического оборудования, изготовленного из конструкционных и теплоустойчивых сталей в зонах локализации пластической деформации представлены в работе. Образцы из сталей 20 и 12Х1МФ исследовались как в исходном состоянии, так и после эксплуатации в течение 219 и 360 тысяч часов соответственно. Установлено, что структурно-фазовое состояние в зонах локализации деформаций оказывает непосредственное влияние на характеристики неразрушающих испытаний. Так, для всех исследованных образцов установлены значения таких параметров, как время задержки поверхностной акустической волны, коэффициент затухания, амплитуда принятого сигнала и интенсивность магнитного шума в зонах локализации деформации.

Ключевые слова: энергетическое оборудование; конструкционные и теплоустойчивые стали; механические свойства, структурно-фазовое состояние, акустические и магнитные характеристики, зона локализации деформации.

Введение

Организация защиты жизненно важных интересов личности и общества от аварий на потенциально опасных объектах является одной из главных задач современного производства, достижение которой невозможно без достоверной диагностики оборудования и надежной оценки остаточного ресурса [1–3].

Известно [4], что в металле энергетического оборудования в процессе длительной эксплуатации под действием высоких температур и давления происходят сложные физико-химические процессы, которые приводят к изменению структурно-фазового состояния, зарождению, накоплению микродефектов и затем к разрушению элементов оборудования.

Количество оборудования, выработавшего парковый ресурс, с каждым годом увеличивается. 49 % такого оборудования по официальной статистике установлено на начало 2019 года. Однако для отдельных групп оборудования и предприятий достигнут показатель в 95 %. Наибольшее количество аварий и несчастных случаев на опасных производственных объектах выявлено в Сибирском федеральном округе при этом. Выполненный анализ причин аварий и несчастных случаев, происшедших за последние 5 лет при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением, показал, что трубопроводы пара и

горячей воды являются одним из наиболее опасных видов оборудования, работающего под избыточным давлением, несмотря на отсутствие таких опасных факторов, как наличие взрыво-, пожароопасной и токсичной сред.

Кроме того, анализ основных причин аварий, происшедших в период 2015-2019 гг., показывает, что вероятность разрушения оборудования остаётся высокой, даже при наличии положительного заключения экспертизы промышленной безопасности (ПБ). Так как почти 40 % аварий случились из-за низкого качества диагностирования и экспертизы ПБ оборудования. В то же время менее 10 % происшествий (аварий и несчастных случаев) связано с эксплуатационными дефектами оборудования.

Методы и аппаратура неразрушающих испытаний, связанные с исследованием структурного состояния, развиваются в настоящее время [5]. Ряд критериев предельного состояния основного и наплавленного металла, а также сварных соединений разработан на основе зависимостей характеристик методов неразрушающих испытаний с количественными показателями структурно-фазового состояния. [6, 7]. Но данные критерии требуют уточнения, т.к. связаны с предельным состоянием оборудования. Повышение достоверности и точности проводимой оценки невозможно без анализа структурно-фазового состояния и механических характеристик металла энергетического оборудования после длительной эксплуатации. Обнаружение характерной зоны предразрушения или зоны локализации деформаций является важным аспектом. Одним из главных преимуществ такого подхода является принципиальная возможность обнаружения места будущего разрушения образца задолго до образования шейки. При этом место будущего разрушения совпадает с зоной локализации деформации. Цель данной работы заключается в выявлении зон локализации деформации физическими методами неразрушающих испытаний как основа принципиально нового подхода к определению мест предразрушения и к оценке остаточного ресурса длительно работающего энергетического оборудования.

Материалы и экспериментальные процедуры

Для проведения заявленных исследований были использованы образцы, вырезанные из водоопускной трубы фронтального экрана энергетической установки без эксплуатации, после эксплуатации в течение 219 тысяч часов без разрушения и в течение 242 тысяч часов до разрушения, материал – сталь 20. А также образцы изгиба паропровода перед выхлопным клапаном также без эксплуатации, после эксплуатации в течение 260 тысяч часов без разрушения и в течение 263 тысяч часов до разрушения, материал – сталь 12Х1МФ. Химический состав исследуемой стали приведен в табл. 1.

Таблица 1 – Химический состав (масс. %) исследованных сталей

Марка стали	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Va	Fe
20	0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	до 0,25	до 0,25	до 0,25	до 0,04	до 0,035	до 0,08	~98
12Х1МФ	0,08-0,15	0,17-0,37	0,4-0,7	0,9-1,2	до 0,3	0,25-0,35	до 0,025	до 0,03	0,15-0,3	~96

Использовалась форма образцов – «dog-bone» с размерами рабочей части 40×6×2 мм (рис. 1).

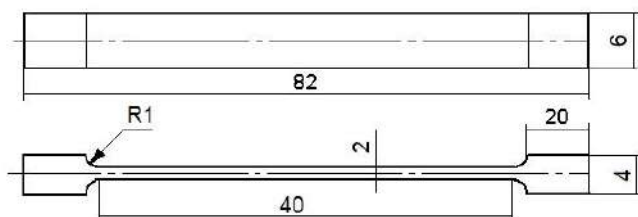


Рисунок 1 – Размеры и форма образцов для экспериментальных исследований

Микроструктура анализировалась при помощи оптического микроскопа Neophot-21 с цифровой технической видеокамерой UCMOS03100KPA. Механические характеристики оценивались при испытаниях на одноосное растяжение при комнатной температуре с постоянной скоростью на испытательной машине Walter+Bai AG LFM-125. Скорость движения подвижного захвата равнялась 0,4 мм/мин (квазистатические испытания). Одновременно с растяжением проводилась регистрация картин локализации деформации методом цифровой корреляции изображений (DIC) [8], который был реализован с помощью видеокамеры PL-B781F при освещении лазером SNF-xxx-635-30-KB. Те же самые эксперименты для сравнения были проведены на аналогичных образцах, вырезанных из труб таких же размеров, но которые не были в эксплуатации – исходное состояние.

Исследование структуры металла в зонах локализованной деформации проводилось при помощи метода просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на тонких фольгах на электронном микроскопе ЭМ-125 и ускоряющем напряжении 125 кВ [9, 10]. Рабочее увеличение в колонне микроскопа равнялось 25000 крат.

Для каждого образца в результате проведенных исследований был установлен качественный и количественный фазовый состав и оценены следующие параметры тонкой структуры: скалярная ρ и избыточная ρ_{\pm} плотность дислокаций, объемные доли структурных составляющих стали, амплитуда внутренних напряжений (напряжение сдвига и дальнедействующие напряжения), кривизна-кручение кристаллической решетки χ . Все количественные параметры тонкой структуры рассчитаны как в каждой структурной составляющей стали, так и в целом по каждому образцу [11].

На образцах перед и после пластической деформации проводились испытания неразрушающими методами: спектрально-акустический (измерительно-вычислительный комплекс «АСТРОН» [12]) и магнито-шумовой методы (анализатор структуры и напряжений «Introsan» [13]). При этом определялись такие характеристики, как время задержки и скорость поверхностных акустических волн, коэффициент затухания, размах амплитуды принятого сигнала, интенсивность магнитного шума.

Результаты и обсуждение

Результаты исследований были статистически обработаны и построены зависимости параметров структурного состояния и механических характеристик от результатов неразрушающих испытаний в металле образцов из стали 20 и 12Х1МФ, в том числе в зонах локализации деформаций.

Так, при увеличении амплитуды моментных (дальнодействующих) полей внутренних напряжений (σ_d , МПа) с 245 до 405 МПа наблюдается возрастание времени задержки поверхностной акустической волны (R , нс) на 145 нс (рис. 2). Скорость распространения поверхностной акустической волны (V , м/с) лучше описывает изменение величины кривизны-кручения кристаллической решетки (χ , см⁻¹), чем коэффициент затухания поверхностной акустической волны ($K_{зат}$, 1/мкс) (рис. 3).

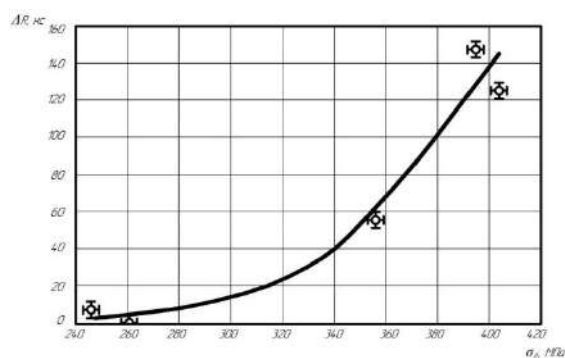


Рисунок 2 – Влияние амплитуды моментных (дальнодействующих) полей внутренних напряжений (σ_d , МПа) на время задержки поверхностной акустической волны (R , нс)

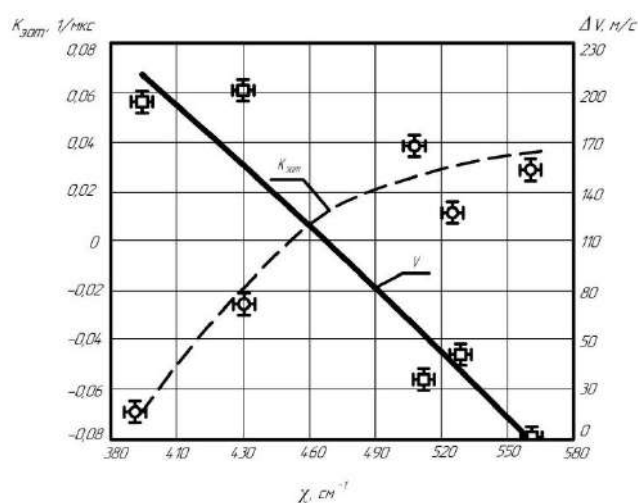


Рисунок 3 – Влияние величины кривизны-кручения кристаллической решетки (χ , см⁻¹) на коэффициент затухания поверхностной акустической волны ($K_{зат}$, 1/мкс) и скорость распространения поверхностной акустической волны (V , м/с)

Установленные зависимости имеют высокие значения коэффициента корреляции. В реальной практике проведения диагностических работ при экспертизе промышленной безопасности нет возможности глубокого исследования металла методами электронной микроскопии или использования методов спекл-фотографирования и цифровой корреляции изображений в процессе эксплуатации энергооборудования. Результаты неразрушающих испытаний, полученные во время остановов оборудования для проведения контрольных испытаний и ремонтно-восстановительных работ являются одним из возможных видов

информации [14–16]. Для установления характеристик неразрушающих испытаний, наиболее подходящих для оценки того или иного структурного или деформационного показателя, при помощи статистической обработки результатов исследований на основе сравнения полученных значений коэффициентов корреляции для оборудования из сталей марок 20 и 12Х1МФ были выбраны зависимости структурных и деформационных показателей от акустических и магнитных характеристик (табл. 2), которые позволили с достаточной степенью достоверности оценивать структурные и механические показатели.

Таблица 2 – Зависимости структурных и деформационных показателей от акустических и магнитных характеристик

Сталь 20	Сталь 12Х1МФ
$\rho = 2,7597+0,0003A-5,7679 \times 10^{-6} A^2$	$\rho = -871,11+0,3777R-4,0809 \times 10^{-5} R^2$
$\rho_{\pm} = -363,25+0,2004V-2,7421 \times 10^{-5} V^2$	$\rho_{\pm} = 10,81-0,00237432V$
$\chi = -3,3745 \times 10^{-5} +179,9686V-0,0239V^2$	$\chi = 27452,28-13,13V+0,0016V^2$
$\sigma_{JI} = -2371,44+0,7080649V$	$\sigma_{JI} = -28663,05+12,7609R-0,0014R^2$
$\sigma_{\delta} = 535,56-0,744254329A$	$\sigma_{\delta} = -2,276 \times 10^{-5} +95,7175R-0,01R^2$
$a_1 = 2,04-0,0049163803MNI$	$a_1 = 0,52-3,1536K_{\text{заг}}-64,692K_{\text{заг}}^2$, при $K_{\text{заг}} < 0$; $a_1 = 0,78-2,46726 * K_{\text{заг}}$, при $K_{\text{заг}} > 0$
$a_2 = 2,25-0,005016609MNI$	$a_2 = 0,75-4,355K_{\text{заг}}-95,4879K_{\text{заг}}^2$, при $K_{\text{заг}} < 0$; $a_2 = 0,94-3,341855 * K_{\text{заг}}$, при $K_{\text{заг}} > 0$

Выводы

Для установления характеристик неразрушающих испытаний, наиболее подходящих для оценки того или иного структурного или деформационного показателя, при помощи статистической обработки результатов исследований на основе сравнения полученных значений коэффициентов корреляции для оборудования из конструкционной и теплоустойчивой сталей были выбраны зависимости структурных и деформационных показателей от акустических и магнитных характеристик, которые позволили с достаточной степенью достоверности оценивать структурные и механические показатели.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для поддержки молодых кандидатов наук МК-1084.2020.8.

Список литературы

1. Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2020, №1(106). – С. 22–24.
2. РД 34.17.421-92. Типовая инструкция по контролю и продлению срока службы металла основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций.
3. СТО-021-21-21-2003. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов тепловых электрических станций. Контроль состояния металла. Нормы и требования.

4. Смирнов А. Н., Козлов Э.В. Субструктура, внутренние поля напряжений и проблема разрушения паропроводов из стали 12Х1МФ. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2004. – 163 с.
5. Смирнов, А. Н. Акустические и физико-механические показатели теплоустойчивой стали в окрестности трещины / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, А. С. Глинка и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №10. – С. 40–45.
6. Смирнов А.Н. Оценка ресурса длительно работающего металла оборудования топливно-энергетического комплекса на основе структурных критериев / А.Н. Смирнов, Н.В. Абабков, Н.Ф. Ощепков и др. // Сварка и диагностика, 2015. - № 5. - С. 9-12.
7. Смирнов, А.Н. Влияние степени деформации сварных соединений углеродистых сталей на структурно-фазовое состояние и поля внутренних напряжений/ А. Н. Смирнов, Э. В. Козлов, Е. А. Ожиганов и др. // Сварка и диагностика. 2016. – № 3. – С. 25–28.
8. Зуев, Л. Б. О природе упругопластического инварианта деформации / Л. Б. Зуев, В. И. Данилов, С. А. Баранникова и др. // ЖТФ. 2018. Т. 88. № 6. С. 855-859.
9. Козлов, Э. В. Фрагментированная субструктура, формирующаяся в ОЦК-сталях при деформации / Э. В. Козлов, Н. А. Попова, Н. А. Конева // Изв. РАН. Серия физическая. – 2004. – Т.68, №10. – С.1419-1427.
10. Конева, Н. А. Физическая природа стадийности пластической деформации / Н. А. Конева, Э. В. Козлов // Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1990. – С. 123–186.
11. Смирнов, А. Н. Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 1. Микроскопия и рентгеноструктурный анализ / А. Н. Смирнов, Э. В. Козлов, Н. В. Абабков и др. // Вестник КузГТУ. – 2010. – №4. – С.62–68.
12. Абабков, Н. В. 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. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. - № 5. - С. 101-106.
13. Смирнов, А. Н. Анализ проблем, связанных с безопасной эксплуатацией элементов энергетического машиностроения/А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. - 2010. - №2. - С. 12-17.
14. Смирнов, А.Н. Особенности упругопластического перехода в сварных соединениях стали 09Г2С, выполненных дуговой сваркой при различных режимах тепловложения / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, Е. А. Ожиганов и др. // Сварка и диагностика. 2017. – № 4. – С. 15–20.
15. Смирнов А. Н., Абабков Н. В. Комплексный подход к оценке работоспособности элементов энергетического оборудования // Известия Самарского научного центра РАН. - 2010. - Т. 12. № 1 (2). - С. 520-524.
16. Иванов, Ю. Ф. Объемная и поверхностная закалка конструкционной стали – морфологический анализ структуры / Ю. Ф. Иванов, Э. В. Козлов // Изв. вузов. Физика. – 2002. – №3. – С.5-23.

CORRELATION BETWEEN STRUCTURAL PARAMETERS, MECHANICAL PROPERTIES, AND ACOUSTIC AND MAGNETIC CHARACTERISTICS IN ZONES OF STABLE LOCALIZATION OF POWER EQUIPMENT MADE OF STRUCTURAL AND HEAT-RESISTANT STEELS

Ababkov N.V., C.Sc. (Engineering), Assistant professor, e-mail: n.ababkov@rambler.ru
Smirnov A.N., D.Sc. (Engineering), Professor

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyay ast., Kemerovo, 650000, Russia

Abstract

The results of the analysis of the microstructure, mechanical properties, acoustic and magnetic characteristics of the metal of heat-and-power equipment after long-term operation, made of structural and heat-resistant steels in the zones of localization of plastic deformation, are presented. Specimens of structural and heat-resistant steels were investigated, in the initial state, as well as after operation for 219 and 360 thousand hours, respectively. It was found that the structural-phase state in the zones of localization of deformations has a direct impact on the characteristics of non-destructive tests. Thus, for all investigated samples, the values of such parameters as the delay time of the surface acoustic wave, the attenuation coefficient, the amplitude of the received signal, and the intensity of magnetic noise in the zones of deformation localization were established.

Keywords: power equipment; structural and heat-resistant steels; mechanical properties, structural-phase state, acoustic and magnetic characteristics, deformation localization zone.

УДК 621.793

ВНЕДРЕНИЕ НАНОУГЛЕРОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ВИДЕ ФУЛЛЕРЕНОВОЙ ЧЕРНИ В ГАЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА (СВМПЭ)

*СОКОРОВ И.О.*¹, к.т.н., доцент, e-mail: sokorov@yandex.ru
*КАСПЕРОВИЧ А.В.*², к.т.н., доцент, e-mail: andkasp@mail.ru
*ПОТАПЧИК А.Н.*², e-mail: alexander.potapchik@mail.ru
*ВОЛОДЬКО А.С.*³, e-mail: plazteh@bntu.by
*ВАНЮК Э.А.*³, e-mail: eduard.vanyuk@gmail.com
*КЕРЕЛЬ А.Д.*³ e-mail: annakerel@yandex.ru

¹ УО «Республиканский институт профессионального образования», 220004, ул. К. Либкнехта, 32, г. Минск, Республика Беларусь;

² УО «Белорусский государственный технологический университет», 220006, ул. Свердлова, 13а, Минск, Республика Беларусь;

³ Белорусский Национальный Технический Университет, 220013, пр. Независимости 65 Минск, Республика Беларусь

Аннотация

В работе проанализированы результаты исследований в области полимерных покрытий и нанокремнеземных компонентов, а также произведены исследования на абразивную износостойкость полимерных покрытий из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) марки GUR-4120.

Ключевые слова: газотермическое напыление, газопламенное напыление, сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), фуллерен, фуллереновая сажа, фуллереновая чернь.

Введение

Развитие современных направлений машиностроения связано на прямую с использованием новых материалов и технологий получения деталей машин и механизмов. Одно из таких направлений — это применение различных способов упрочнения и восстановления деталей машин и узлов трения с целью постоянного повышения физико-механических и эксплуатационных свойств поверхностей деталей. К таким способам упрочнения и восстановления относятся газотермические способы нанесения покрытий, позволяющее наносить на деталь как металлические так и полимерные покрытия. Если металлические покрытия работают в тяжелых эксплуатационных условиях влияющих на прямую работоспособность механизма и машины, то полимерные покрытия работают в менее тяжелых но не вало важных условиях и применяются в различных отраслях промышленности, к которым относятся: автомобилестроение (облицовка кузовов самосвалов), текстильная и целлюлозно-бумажная отрасли (катки, зубчатые передачи, опорные втулки, направляющие), химическая отрасль (фильтры для работы в агрессивных средах), спорт (лыжи, сноуборды) и многие другие отрасли [1].

Перспективным материалом с широким спектром функциональных свойств, который применяется в настоящее время во многих отраслях промышленности, является сверхвысо-

комолекулярный полиэтилен (СВМПЭ, англ. Ultra-high molecular weight polyethylene – УНМВРЕ), который относится к термопластичным полимерам [2].

Достоинства СВМПЭ заключаются в сочетании высокой износостойкости, устойчивости к агрессивным средам, низкого коэффициента трения, высокой ударной вязкости, низкой температуры хрупкости, что позволяет применять изделия на его основе, в том числе в экстремальных условиях эксплуатации (температура хрупкости материала – до $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ограничивающими факторами применения СВМПЭ являются невысокая температура плавления ($135\text{--}190\text{ }^{\circ}\text{C}$), в связи с чем верхний предел температуры эксплуатации материала составляет $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также высокая вязкость расплава полимера, что затрудняет процесс его переработки [3-5]. Основным способом применения СВМПЭ является прессование – в пределах 60% общего объема выпускаемых деталей, методом плунжерной экструзии получают 35% изделий, в оставшиеся 5% входят способы литьем под давлением, червячная экструзия, газопламенное напыление и другие способы [5].

В последнее время развивается новое направление применения полимерных покрытий — это создание фуллереносодержащих полимерных композиционных материалов, объединением фуллеренов с полезными свойствами полимеров. Активность фуллеренов позволяет применять их в технологических процессах, связанных с получением совершенно новых материалов.

Согласно результатам исследований авторов [6,7] установлено, что у полимерных покрытий модифицированных фуллереном значительно повышаются эксплуатационные характеристики. В связи с этим было выдвинуто предположение, что модифицирование компонентами фуллереновой черни покрытий СВМПЭ марки GUR-4120 позволит повысить физико-механические и эксплуатационные свойства. Фуллереновая чернь (ФЧ) – это фуллереновая сажа после извлечения смеси фуллеренов неполярными органическими растворителями, и обработанная паром для удаления органического растворителя. В такой саже содержание фуллеренов не более 0,1% [7].

Установлено, что даже незначительное добавление фуллереновых материалов приводит к существенному увеличению прочности и эластичности, а также к заметному снижению коэффициентов трения по металлу и истираемости, а также увеличению температур плавления и деструкции [7-10].

Цель исследований: определить влияние наноуглеродных компонентов в виде фуллереновой черни на абразивную стойкость сверхвысокомолекулярного полиэтилена, полученных газопламенным напылением.

Описание экспериментальных исследований

Для сравнения результатов, на отдельном образце производилась модификация СВМПЭ марки GUR-4120 об. 10% графита.

Для напыления покрытий было подготовлено 4 вида образцов из стали 08кп. Образцы №№1-3 зачищались шкуркой, образец №4 подвергался дробеструйной обработке (рис. 1, а-4).

В качестве способа газотермического нанесения покрытий СВМПЭ использовалось газопламенное напыление. Режимы напыления: дистанция напыления 270 мм, расход пропан-бутана – $1,0\text{ м}^3/\text{ч}$, расход кислорода – $1,0\text{ м}^3/\text{ч}$, расход воздуха – $0,3\text{ м}^3/\text{ч}$, расход порошка – $6\text{--}7\text{ кг/ч}$. Давления газов: кислород - 0,2 МПа, пропан-бутан - 0,05 МПа, сжатый воздух 0,3 – МПа, угол напыления 90 градусов, подача 20...25 мм/с (ТРУ-2.1.Р.Р)

На образец №1 производилось газопламенное напыление чистым СВМПЭ марки GUR-4120 (рис. 1, б-1);

На образец №2 производилось газопламенное напыление СВМПЭ марки GUR-4120 с добавлением 10% графита в объемном эквиваленте (рис. 1, б-2);

На образцы №3 и №4 производилось газопламенное напыление СВМПЭ марки GUR-4120 с добавлением об. 10% компонентов фуллереновой черни (рис. 1, б-3 и 4);

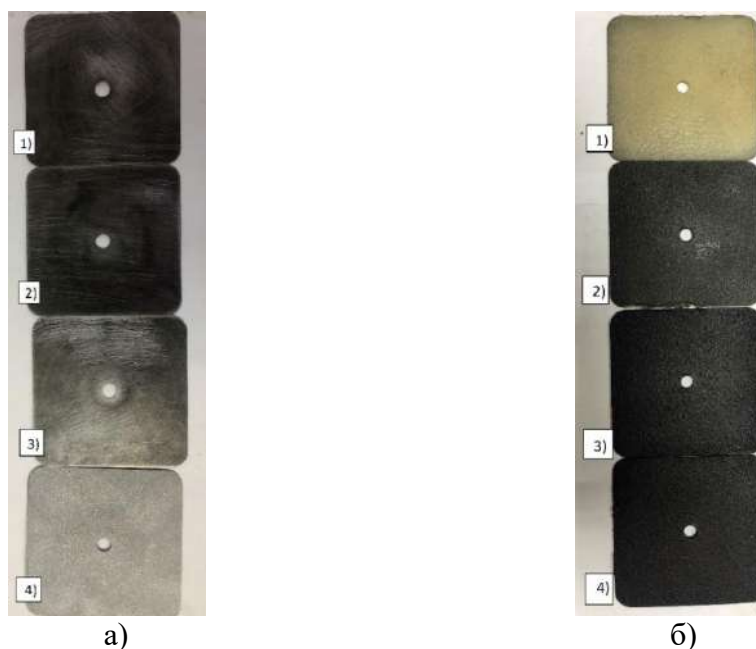


Рисунок 1 – Исследуемые образцы:

а) – образцы, подготовленные перед напылением; б) – образцы после напыления

Технология исследований на абразивную стойкость

Определение стойкости к абразивному износу определялось на приборе Taber GT-7012-T по ИСО 7784-2 – метод определения стойкости покрытий при воздействии абразивного резинового колеса.

Абразивная машина состоит из:

1) поворотного круга, способного вращаться со скоростью (72 ± 2) об/мин, на котором закрепляются испытываемые панели;

2) 2-х абразивных резиновых колес, толщина каждого составляет $(12,7 \pm 0,2)$ мм, закрепленных горизонтально и способных свободно вращаться.

Диаметр колес должен быть $(51,6 \pm 0,1)$ мм для новых и не должен быть менее 44,4 мм при эксплуатации.

Колеса закрепляют на расстоянии $(53,0 \pm 0,5)$ мм друг от друга, ось шпинделей отстоит от оси поворотного круга на $(19,1 \pm 0,1)$ мм. Давление колес при испытании - 1 кг. Всасывающее устройство с двумя соплами, расстояние между ними (75 ± 2) мм, расстояние между соплом и испытываемой панелью от 1-2 мм. При закрытом сопле давление во всасывающем устройстве должно составлять на 1,5-1,6 кПа ниже атмосферного. Калибровочная панель из цинка толщиной 0,8-1 мм. На рисунке 2 представлена пластина для испытаний на абразивную износостойкость:

Испытуемые образцы взвешивают с точностью до 0,1 мг, закрепляют их на поворотном круге, включают установку и выполняют установленное в программе количество оборотов (1000 об).

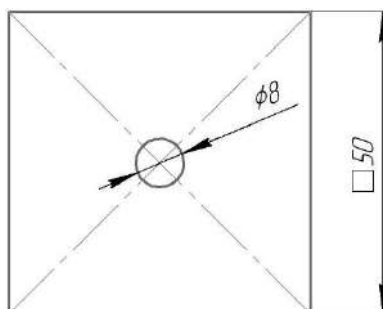


Рисунок 2 – пластина для испытаний на абразивную стойкость

После окончания цикла испытываемую панель снимают, проводят визуальный осмотр покрытия и взвешивают панель.

Для каждого образца определяют потерю массы на заданное число оборотов круга, затем вычисляют среднюю потерю массы у каждого образца. Общее время испытаний для каждого из образцов составило 13,9 мин на 1000 циклов.

Результаты исследований

Исследования на абразивную износостойкость образцов (табл. 1) показали, что добавка об. 10% компонентов фуллереновой черни в полимерные покрытия способствует повышению износостойкости покрытий из сверхвысокомолекулярного полиэтилена марки GUR-4120 в 1,5 раза, добавка об. 10% графита способствует снижению износостойкости в 1,2 раза.

Таблица 1 – результаты исследований образцов на абразивную износостойкость

№ образца	Масса до испытаний m_1 , г	Масса после испытаний m_2 , г	Износ Δm , мг	Скорость изнашивания, мг/мин	Износостойкость, мин/мг
1	87,561	87,531	30	2,2	0,46
2	83,193	83,153	40	2,9	0,35
3	84,295	84,274	21	1,5	0,66
4	81,206	81,186	20	1,4	0,70

Выводы

Результаты исследований могут быть применимы: для деталей с полимерными покрытиями работающих в узлах трения, для внутренних поверхностей водоперкачивающих насосов, для внутренних поверхностей шнеков комбайнов, для трубопроводов, по которым идет сыпучая смесь, для внутренней защиты бетоносмесителей и др. деталей.

Список литературы

1. С.С. Галибеев, Р.З. Хайруллин, В.П. Архиреев / Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Тенденции и перспективы // Вестник Казанского технологического университета. 2008. №2. С. 50–55.
2. М.И. Валуева, А.С. Колобков, С.С. Малаховский / Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направление применения (обзор) / Труды ВИАМ №3 (87), 2020, стр. 49-57.

3. Михайлин Ю.А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (часть 1) // Полимерные материалы. 2003. №3. С. 18–21.
4. Михайлин Ю.А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (часть 2) // Полимерные материалы. 2003. №4. С. 24–27.
5. Девойно О.Г., Володько А.С., Пилипчук А.П., Девойно Д.Г., Мишин А.А., Исак В.Г. / Формирование многослойных покрытий из сверхвысокомолекулярного полиэтилена на поверхности параамидных тканей методом газопламенного напыления // Сборник: Машиностроение. Минск 2020. вып. 32. стр. 13-18.
6. Т.И. Игуменова, Е.С. Акатов, М.А. Гудков, Г.В. Попов / Взаимодействие фуллеренов с полимерами // Вестник ВГУИТ, №2, 2012. Стр. 125-127.
7. А.И. Буря, О.Ю. Кузнецова / Исследование свойств нанокompозитов на основе ароматического полиамида и фуллереновой черни // Вестник ХНАДУ, Вып. 51, 2010, стр. 96-99.
8. А.Т. Волочко, А.А. Шегидевич / Исследования свойств композитов на основе алюминий-кремниевого сплава и наноструктурированного углерода / Журнал: новые материалы и технологии в машиностроении. ФГБОУ ВПО Брянская государственная инженерно-технологическая академия, 2014, стр. 31-35.
9. С.Д. Куш, Н.С. Куюнко. Фуллереновая чернь: строение, свойства и применение // Журнал общей химии. 2011. Т.81 Вып. 2;
10. Е.А. Грузинская, В.А. Кескинов, М.В. Кескинова, К.Н. Семенов, Н.А. Чарыков. Фуллереновая сажа электродугового синтеза // НАНОСИСТЕМЫ: ФИЗИКА, ХИМИЯ МАТЕМАТИКА, 2012, 3 (6), С. 83-90.

INTRODUCTION OF NANOCARBON COMPONENTS IN THE FORM OF FULLERENE BLACK IN GAS-THERMAL POLYMER COATINGS BASED ON ULTRA-HIGH MOLECULAR POLYETHYLENE (UHMWPE)

I.O. Sokorov¹, p.h.d., assistant of professor, e-mail: sokorov@yandex.ru
A.V. Kasperovich², p.h.d., assistant of professor, e-mail: andkasp@mail.ru
A.N. Potapchik², e-mail: alexander.potapchik@mail.ru
A.S. Volodko³, e-mail: plazteh@bntu.by
E.A. Vanyuk³, e-mail: eduard.vanyuk@gmail.com
A.D. Kerel³, e-mail: annakerel@yandex.ru

¹ УО «Republican Institute of Professional Education», 220004, 32 K. Liebknecht Street, Minsk, Republic of Belarus;

² УО «Belarusian State Technological University», 220006, 13a Sverdlova street, Minsk, Republic of Belarus;

³ Belarusian National Technical University, 220013, 65 Nezavisimosti Ave., Minsk, Republic of Belarus;

Abstract

The paper analyzes the results of research in the field of polymer coatings and nanocarbon components, as well as studies on the abrasive wear resistance of polymer coatings made of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) of the brand GUR-4120.

УДК

ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЯ AlTiN ОТ МАТЕРИАЛА ПОДЛОЖКИ

КАМЕНЕВА Анна Львовна, д.т.н., доцент, annkat789@mail.ru,
БУБЛИК Н.В. аспирант, knv143@mail.ru

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614900,
г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

Аннотация

Тонкие покрытия AlTiN были получены PVD методами на различных материалах подложек Ст3, P18, BK8. Электрохимические измерения (вольтамперометрия, импедансная спектроскопия) проводили на образцах с покрытием в 3% NaCl. Коррозионное поведение покрытий характеризовали плотностью тока коррозии $i_{кор}$, сопротивлением поляризации R_p (при потенциале коррозии), отношениями $i_{кор.подл.}/i_{кор}$ и $R_p/R_{п.подл.}$. Влияние подложки на коррозионную стойкость покрытий наблюдается при образовании глубоких несплошностей и микротрещин в структуре покрытия. Покрытие AlTiN/P18, осажденное импульсным магнетронным распылением, наиболее устойчиво к коррозии в 3% NaCl. Плотность тока коррозии для этих покрытий составляет порядка $3,0 \cdot 10^{-7}$ А/см². Микротвердость H и модуль упругости E определяли с использованием системы FISCHERSCOPE H100C в соответствии со стандартом DINENISO 14577-1. Установлено, что данные свойства не влияют на электрохимическое поведение покрытия AlTiN в 3% NaCl, однако все изученные свойства зависят от материала подложки и ее свойств.

Ключевые слова AlTiN, PVD методы, Ст3, P18, BK8, электрохимические свойства, 3% NaCl, физико-механические свойства.

Введение

Выгодным отличием нового класса наноструктурированных покрытий является сочетание высокой твердости ($H > 40$ ГПа), упругого восстановления ($We > 70\%$), трибологических и коррозионных свойств [1-6]. Эффективность данных покрытий зависит от их фазового и элементного состава, структуры, строения, физико-механических и трибологических свойств материалов подложки и покрытия [2-7].

В работе [8] было показано, что на морфологию поверхности и механические свойства покрытий AlCrN, нанесенных электродуговым испарением, влияет содержание углерода в подложке. Увеличение содержания углерода в подложках приводит к увеличению адгезии между подложкой и покрытием. Также было обнаружено, что покрытие AlCrN на подложке ШХ-15 с минимальной шероховатостью имеет более высокую износостойкость, чем покрытие AlCrN на стали 17NiCrMoS6-4. В работе [9] установлено, что композиция TiAlN / чугун имеет более низкий коэффициент трения по сравнению с TiAlN / нержавеющей сталь и TiAlN / углеродистая сталь.

Настоящая работа посвящена изучению зависимостей коррозионных и физико-механических свойств наноструктурированных покрытий AlTiN от материала подложки и установлению зависимостей данных свойств.

Методика эксперимента

Покрытие AlTiN наносили методом импульсного магнетронного распыления (ИМР) на автоматической установке UNICOAT600, оснащенной дуальной магнетронной системой с двумя плоскими мишенями Ti и Al на Ст.3 и P18 и электродуговым испарением (ЭДИ) композиционного катода TiAl на модернизированной установке ННВ-6,6-И1. Размер стальных тестовых образцов составил 10x10x3 мм. В качестве тестовых образцов из ВК8 использовали твердосплавные пластины. Перед напылением все тестовые образцы (подложки) из сталей Ст.3, P18 и твердого сплава ВК8 сначала были механически отполированы, очищены ацетоном, ультразвуковой очисткой в Нефрасе, промыты водой, высушены теплым воздухом и, наконец, очищены этиловым спиртом для удаления поверхностных загрязнений и поверхностных оксидных слоев. После фиксации подложек в вакуумной камере было получено базовое давление 9×10^{-4} Па. Ионная очистка - нагрев подложек проводилась в среде Ag при высоком напряжении 950 В в течение 10 минут. На очищенную подложку наносили подслои различного состава и толщины для увеличения адгезии покрытий к подложке (Таблица).

Давление газовой смеси $P=0,28$ Па, напряжение на подложке $U_{см}=60$ В, ток на Ti мишени во время нанесения покрытий AlTiN методом ИМР поддерживался постоянным $I=15$ А, а на Al мишени - $I=12$ А при осаждении на Ст3 и $I=15$ А – на P18. Содержание N_2 в газовой смеси при осаждении подслоя TiN соответствовало 25%, а при нанесения основного покрытия AlTiN - 30%. Покрытие AlTiN методом ЭДИ осаждалось на подложку из ВК8 при давлении азота 0,3 Па, $U_{см}=280$ В, $I=100$ А. Материал подложки, материал и толщина покрытия AlTiN и подслоя TiN приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Материал подложки, материал и толщина покрытия AlTiN и подслоя TiN

№ образца	Материал подложки	Материал/Толщина, мкм	
		Подслой	Покрытие
1	Ст3	TiN/0,1	AlTiN/1,6-1,7
2	P18	TiN/0,3	AlTiN/3,4-3,5
3	ВК8	TiN/0,1	AlTiN/2,0-2,1

Электрохимические измерения (поляризационные кривые, спектры импеданса) проводили в 3% растворе NaCl (на открытом воздухе) при комнатной температуре (19–22 °С). Раствор готовили из химически чистого реагента и деионизированной воды (MilliQ). Электрохимическая ячейка, подготовка электродов и порядок измерений описаны в работах [6–10]. Все электродные потенциалы указаны относительно стандартного водородного электрода. После погружения электрода в рабочий раствор отслеживали потенциал коррозии $E_{кор}$ до достижения установившегося потенциала (от 60 до 90 мин). Затем измеряли импеданс при $E_{кор}$ в диапазоне частот $f=10...0,01$ Гц при среднеквадратичной амплитуде переменного потенциала 10 мВ. Измерения проводили с помощью потенциостата Solartron 1287 и анализатора частотной характеристики Solartron 1255 (Solartron Analytical). Программное обеспечение CorrWare, ZPlot, CorrView и ZView (Scribner Associates, Inc.) использовали для измерений и обработки данных.

Коррозионное поведение покрытий характеризовали отношениями плотности тока коррозии (i) подложки $i_{кор.подл.}$ и покрытия $i_{кор}$ ($i_{кор.подл.}/i_{кор}$), а также отношениями сопротивления поляризации и потенциала коррозии покрытия и подложки $R_p/R_{п.подл.}$ и $E_{кор}/E_{кор.подл.}$. Плотность тока коррозии определялась экстраполяцией линий Тафеля на потенциал корро-

зии, сопротивление поляризации определялось из данных импеданса как низкочастотный предел действительной части импеданса.

Физико-механические свойства покрытий AlTiN, включая микротвердость H и модуль упругости E определяли с использованием системы FISCHERSCOPE H100C в соответствии со стандартом DINENISO 14577-1 [11, 12]. Влияние материала подложки на физико-механические свойства композиции покрытие/подложка оценивали по соотношениям $H/H_{\text{подл}}$, $E/E_{\text{подл}}$.

Описание экспериментальных исследований

Микроструктура поверхности и изломов покрытий AlTiN приведены на рис. 1. Локальное разрушение поверхности покрытия AlTiN на Ст3, осажденное при токе на Al мишени 12 А, вызвано образованием в нем поверхностных напряжений (рис. 1, а-б). Высота единичных капельных тел превышает высоту покрытия (рис. 1, б). Прочность покрытия AlTiN в его глубоких несплошностях понижена в связи с минимальным содержанием Al и Ti. Покрытие AlTiN на P18 с повышением тока на Al мишени до 15 А формируется с большим содержанием в нем Al (рис. 1, в). Максимальное содержание Al обнаружено также в капельных телах. Глубина несплошностей его поверхности, а также размер и дефектность единичных капельных тел уменьшились (рис. 1, в). Покрытие AlTiN на BK8 столбчатого строения содержит многочисленные капельные тела, как на поверхности, так и в теле покрытия (рис. 1, г).

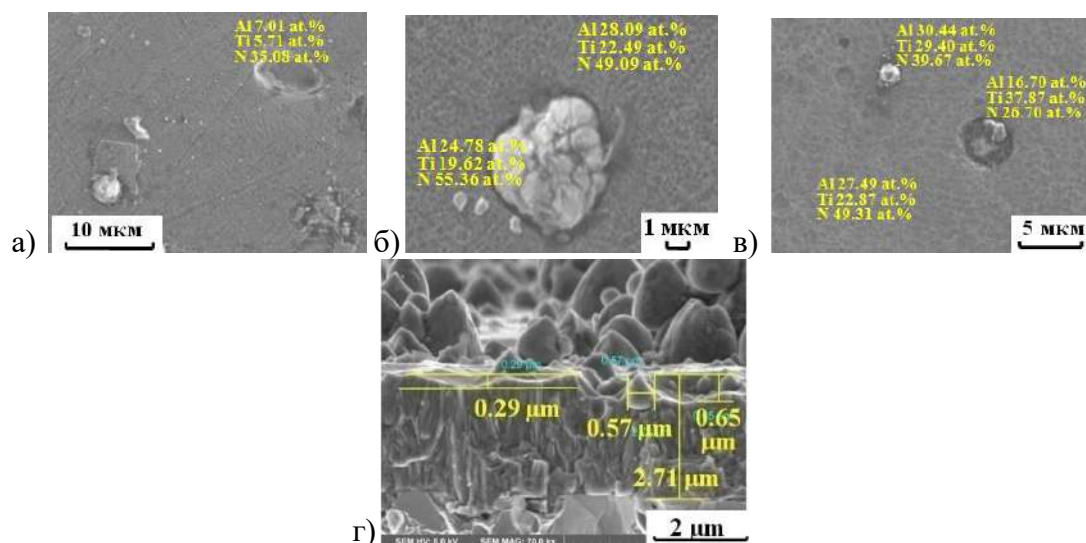


Рисунок 1 – Морфология поверхности (и излома для AlN/BK8) покрытий: а-б) AlTiN/Ст3 (10x5 мкм), в) AlTiN/P18 (Ø 4,3 мкм), г) AlN/BK8. (в скобках приведены размеры несплошностей)

Коррозионное поведение покрытия AlTiN зависит от материала подложки. Ст3 обладает минимальной коррозионной стойкостью в 3.5 % NaCl. Коррозионная стойкость покрытия AlTiN минимальна в связи протеканием раствора 3.5 % NaCl через его дефекты (рис. 1, а-б). Уменьшению скорости коррозии покрытия AlTiN/P18 объясняется минимальной его дефектностью и максимальным содержанием Al и Ti в покрытии (рис. 1, в). Ускорение скорости коррозии покрытия AlTiN/BK8 происходит за счет проникания 3.5 % NaCl через многочисленные микроскопические каналы между капельными телами и покрытием (рис. 1, г).

Подложка ВК8 отличается от Ст3 и P18 меньшей плотностью тока коррозии $i_{кор}$ и более высоким значением потенциала коррозии $E_{кор}$. На рис. 2 показаны диаграммы, иллюстрирующие отношения $i_{кор.подл.}/i_{кор}$, $E_{кор}/E_{кор.подл}$ и $R_{п}/R_{п.подл}$, $H/H_{подл}$ и $E/E_{подл}$ для покрытий AlTiN на различных подложках.

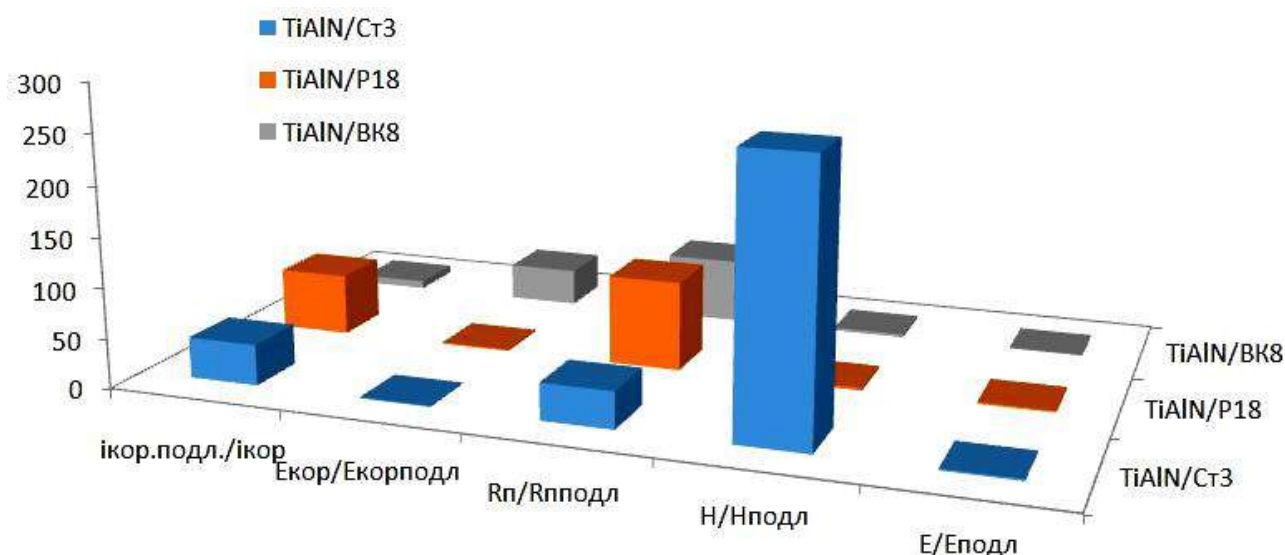


Рисунок 2 – Зависимость коррозионных ($i_{кор.подл.}/i_{кор}$, $E_{кор}/E_{кор.подл}$ и $R_{п}/R_{п.подл}$) и физико-механических свойств ($H/H_{подл}$, $E/E_{подл}$) покрытия AlTiN от аналогичных свойств материала подложки (Ст3, P18 и ВК8)

По наибольшей величине $i_{кор.подл.}/i_{кор}=62$ и $R_{п}/R_{п.подл}=90$ и $E_{кор}/E_{кор.подл}=1,98$ можно судить о минимальной скорости протекания электрохимических реакций и максимальном снижении скорости коррозии в 3% NaCl у покрытия AlTiN на P18. В случае отсутствия каналов в покрытии до подложки скорость коррозии для AlTiN/ВК8 была бы также минимальной. По величине $R_{п}/R_{п.подл}$ можно судить о минимальном замедлении коррозионных процессов у покрытия AlTiN на Ст3. Максимальное увеличение отношений $H/H_{подл}=280$ и $E/E_{подл}=1,8$ для композиции AlTiN / Ст3 не отразилось на коррозионных свойствах покрытия.

Результаты и обсуждение

Покрытия AlTiN приводят к значительному снижению токов в анодной области (в некоторых случаях более чем в 1000 раз). Плотность тока коррозии $i_{кор}$ покрытия AlTiN на Ст3, P18 и ВК8 составляет $5,7 \cdot 10^{-7}$ А/см², $2,7 \cdot 10^{-7}$ А/см², $2,9 \cdot 10^{-7}$ А/см², соответственно. Наблюдается зависимость анодной поляризации от природы подложки. Наиболее низкие анодные токи наблюдаются для AlTiN на P18, наиболее высокие токи – для AlTiN на Ст3. В связи с этим, покрытия AlTiN в большей степени уменьшают скорость коррозии стали P18.

Покрытие AlTiN значительно снизило анодные токи при высоких потенциалах. Величина $i_{кор}$ для AlTiN/Ст3 примерно в 2 раза превышает j_{corr} для AlTiN/P18, что вызвано проникновением агрессивной среды по границе раздела капельного тела и покрытия AlTiN/Ст3, нарушением сплошности покрытия AlTiN и минимальным количеством Al и Ti в его глубоких несплошностях.

Обобщая результаты, полученные методами поляризационных и импедансных измерений, установлено, что основными факторами, определяющими на коррозионное поведение исследованных покрытий, являются следующие:

- *Влияние материала покрытий AlTiN на его коррозионную стойкость.* Исследованные покрытия не являются электрохимически инертными.

- *Влияние материала подложки на коррозионную стойкость покрытий AlTiN.* В случае образования глубоких несплошностей покрытия до подложки с содержанием элемента подложки > 50 вес.%, микротрещин в структуре покрытия, минимальном содержании элементов покрытия и низкой его плотности происходит окисление подложки. Например, не плотное покрытие AlTiN/Ст3 с крупными капельными телами с минимальным содержанием Cr характеризуется более высокой скоростью коррозии по сравнению с менее дефектным AlTiN/P18. Содержание Cr в подложке способствует снижению скорости коррозии.

Выводы

К покрытиям, проявляющим наиболее высокую коррозионную стойкость в 3% NaCl, можно отнести покрытие AlTiN на P18. Плотность тока коррозии для этих покрытий имеет порядок величины 10^{-7} А/см². Эти же покрытия являются лучшими по критерию R_p .

Физико-механические свойства покрытие AlTiN на различных подложках не влияют на коррозионные свойства покрытия.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение фундаментальных научных исследований (Тема "Разработка теоретических и технологических основ и цифровых технологий проектирования функциональных композиционных материалов, многофункциональных нанопокровтий и диагностирующих информационных систем мониторинга высоконагруженных элементов авиационных конструкций", № FSNM-2020-0026).

Список литературы

1. Kameneva A.L. The influence of TiN, ZrN and $Ti_xZr_{1-x}N$ layers of anti-friction multi-layer coatings on corrosion resistance of hard alloy in sodium hydroxide solution // Res. J. Pharm., Biol. Chem. Sci. - 2015. - V. 6. №1. - P. 1381-1391.
2. Kameneva A.L., Karmanov V.V., Dombrovsky I.V. Physical and mechanical properties of $Ti_{1-x}Al_xN$ thin films prepared by different ion-plasma methods // Res. J. Pharm., Biol. Chem. Sci. - 2014. - V.5. № 6. - P. 762-771.
3. Kameneva A.L., Kichigin V.I., Soshina T.O., Karmanov V.V. Using $Ti_{1-x}Al_xN$ coating to enhance corrosion resistance of tool steel in sodium chloride solution // Res. J. Pharm., Biol. Chem. Sci. - 2014. - V. 5. № 5. - P. 1148-1156.
3. Antsiferov V.N., Kameneva A.L. Experimental study of the structure of multicomponent nanostructured coatings on the basis of Ti-Zr-N alloys formed by ionic plasma methods // Russian J. of Non-ferrous metals. - 2007. - V. 48. № 6. - P. 485-499.
4. Kameneva A.L., Guselnikova L.N., Soshina T.O. An influence of a substrate voltage bias and temperature conditions on structure and phase modification in single-component ion-plasmas' films // e-J. of Surf. Sci. Nanotechnol. - 2011. - №9. - P. 34-39.
5. Antonova N.M., Babichev A.P., Dorofeev V.Yu. Regularities of formation of the structure of Al-containing nanocomposites upon interaction of ASD-6 powder with polymer suspension // Prot. Met. Phys. Chem. Surf. - 2013. - V. 49. №7. - P. 868-872.

6. Kameneva A.L., Kichigin V.I. Corrosion, wear, and friction behavior of a number of multilayer two-, three- and multicomponent nitride coatings on different substrates, depending on the phase and elemental composition gradient // *Appl. Surf. Sci.* - 2019. - № 489. - P. 165–174.

7. A.S. Ilina; E.S. Parfenova; I.M. Goncharenko. The influence of changes in the composition of substrate on the mechanical properties of coatings // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), 2016, INSPEC Accession Number: 15819499, doi: 10.1109/MEACS.2015.7414949

8. Chandrashekhar Ambiger, V.R. Kabadi, N. Gupta, K. G. Ambli, Rajesh Bhide. Influence of Substrate of the Carbon Contents and Coating Thickness on Scratch and Wear Resistance of AlCrN Films // *Materials Science and Metallurgy Engineering.* – 2016. - Vol. 3, No. 1. – P. 1-7. doi:10.12691/msme-3-1-1

9. W. Grzesik, Z. Zalisz, S. Krol. Tribological behaviour of TiAlN coated carbides in dry sliding tests. *J. Achievements in Mat. and Manuf. Engg.*. – 2006. – 17. – P. 181-184.

10. Kameneva A.L., Kichigin V.I., Lobov N.V., Kameneva N.V. Data on the effect of structure, elemental and phase composition gradient of nitride multilayer coatings on corrosion protection of different substrates in 3% NaCl and 5% NaOH solutions // *Data in Brief.* - 2019. - № 27. - 104796.

11. Kameneva A. L. The influence of aluminum on the texture, microstructure, physical, mechanical and tribological properties of $Ti_{1-x}Al_xN$ thin films // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences.* 2014. Т. 5. № 6. С. 965–975.

12. Анциферов В.Н., Каменева А.Л. Способ получения покрытия на основе сложных нитридов // патент на изобретение RU 2429311 С1. 2011. Дата публикации: 20.09.2011.

DEPENDENCE OF ELECTROCHEMICAL AND PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF THE AlTiN COATING ON THE SUBSTRATE MATERIAL

Kameneva Anna Lvovna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, ankam789@mail.ru,
Bublik N.V. postgraduate student, knv143@mail.ru

Perm National Research Polytechnic University, 614900, Perm, Komsomolsky prospect, 29

Abstract

Thin AlTiN coatings were obtained by PVD methods on various substrate materials 1017, T1, HG30. Electrochemical measurements (voltammetry, impedance spectroscopy) were carried out on coated samples in the 3% NaCl. The corrosion behavior of the coatings was characterized by the corrosion current density i_{cor} , the polarization resistance R_p (at the corrosion potential), the ratios $i_{cor,sub}/i_{cor}$ and $R_p/R_{p,sub}$. The substrate material effect on the AlTiN coatings corrosion resistance is observed when deep discontinuities and microcracks are formed in the coating structure. The AlTiN coating, deposited by pulsed magnetron sputtering at the steel T1, is most resistant to corrosion in 3% NaCl. The corrosion current density for these coatings is about $3.0 \cdot 10^{-7}$ A/cm². The microhardness H and the Young's modulus E were determined using the FISCHERSCOPE H100C system in accordance with the DINENISO 14577-1 standard. It was found that these properties do not affect the electrochemical behavior of the AlTiN coating in 3% NaCl, however, all studied properties depend on the substrate material and its properties.

Keywords. AlTiN, PVD methods, 1017, T1, HG30, electrochemical properties, 3% NaCl, physical and mechanical properties.

УДК 538.97

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛУЧЕННЫХ ГАММА-КВАНТАМИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ СМЕСЕЙ СИСТЕМЫ Ti-AL

*СИТНИКОВ Александр Андреевич¹, доктор техн. наук, профессор,
e-mail: sitalan@mail.ru*

*ЯКОВЛЕВ Владимир Иванович¹, кандидат техн. наук,
e-mail: yak1961@yandex.ru*

*СОБАЧКИН Алексей Викторович¹, кандидат техн. наук,
e-mail: sobalvi@yandex.ru*

*ЛОГИНОВА Марина Владимировна¹, кандидат техн. наук,
e-mail: logi_m@mail.ru*

МЯСНИКОВ Андрей Юрьевич^{1, 2}, e-mail: myasnikov.andre@yandex.ru

СЫРОВЕЖКИН Михаил Романович¹, e-mail: mr.syrovezhkin@yandex.ru

*ГРАДОБОЕВ Александр Васильевич³, доктор техн. наук, профессор,
e-mail: gradoboev1@mail.ru*

¹Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, 656038, Российская Федерация, г. Барнаул, пр. Ленина, 46

²Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, 630128, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, 30

Аннотация

Были проведены экспериментальные исследования по облучению механоактивированных смесей системы Ti-Al γ -квантами. Гамма-облучению подвергались порошковые смеси состава Ti (64 мас. %) + Al (36 мас. %), механоактивированные на разных временах при энергонапряженности мельницы 40 г до образования интерметаллидной фазы в процессе механоактивационного воздействия. Мощность дозы γ -облучения составляла порядка 1 Гр/с и 0,1 Гр/с. Показано изменение межплоскостных расстояний титана и алюминия, изменение объемов кристаллических решеток, а также изменение размеров кристаллитов и уровня микронапряжений в механоактивированной смеси. Воздействие γ -облучения с мощностью дозы 0,1 Гр/с и 1 Гр/с при разных временах облучения приводит к изменению на микроуровне структурных состояний компонентов смеси. При этом воздействие γ -облучения с мощностью дозы 1 Гр/с оказывает большее влияние на структурные параметры компонентов.

Ключевые слова: гамма-облучение, механоактивация, рентгенофазовый анализ, порошковая смесь, интерметаллиды, алюминиды титана, титан, алюминий.

Введение

Интерметаллические соединения на основе алюминидов титана, в частности γ -фаза TiAl, относятся к классу важных конструкционных материалов. Благодаря уникальному комплексу физических и механических свойств (высокая жаростойкость, высокая прочность, коррозионная стойкость, хорошее сопротивление усталостному разрушению и ползучести),

алюминиды титана являются одними из перспективных материалов для авиакосмической, автомобильной промышленности, судостроения, энергомашиностроения и т.д.

Механическая активация (МА) является способом «грубого» воздействия на порошковую смесь, в котором возможности «тонкого» управления структурой весьма ограничены. Для реализации «тонкого» управления структурой использовалось γ -облучение. Установлено, что во многих случаях γ -облучение может служить эффективным технологическим инструментом, который позволяет получать качественные материалы, существенно усовершенствовать и удешевить производство многих порошковых материалов, улучшить их качество, а также изменить свойства [1–6]. Важно, что при облучении быстрыми электронами или γ -квантами ^{60}Co радиационные дефекты формируются равномерно по объему образца. Процессы радиационно-стимулированной диффузии могут способствовать процессам растворения и гомогенизации, изменять области гомогенности фаз и твердых растворов в объеме механокомпозиата, создавать благоприятные условия для взаимной твердофазной диффузии на межфазных границах. Таким образом, воздействие γ -облучения можно рассматривать как тонкий инструмент для изменения структурного состояния активированных смесей. Следует заметить, что влияние γ -облучения на матричную структуру активированных смесей практически не изучено.

Материалы и методы

Объектом исследования являлись порошки титана ПТХ и порошки алюминия АСД-1. Из указанных порошков приготавливалась механическая смесь состава 1:1 (ат.%). Механическое измельчение проводилось в планетарной шаровой мельнице АГО-2.

Облучение полученных механокомпозиатов проводили:

1) на сертифицированной стационарно установке «Исследователь» (изотоп ^{60}Co) (НИИПП, г. Томск) при нормальных климатических условиях. Мощность дозы γ -облучения в этом случае составляла 1 Гр/с.

2) на станции «Стенд ЭЛВ-6» (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск). Мощность дозы γ -облучения в этом случае составляла 0,1 Гр/с.

Структурно-фазовый анализ образцов проводили на дифрактометре ДРОН-6, с $\text{CuK}\alpha$ -излучением ($\lambda = 15,418$ нм). Дифрактограммы всех образцов регистрировали в идентичных условиях, что позволяло более корректно сравнивать полученные величины. Шаг сканирования $h = 0,05^\circ$, время экспозиции $t = 3$ с, угловой диапазон съемки 2Theta от 20 до 80° .

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 приведены дифрактограммы смеси, механоактивированной в течение 1; 4; 7 мин. при энергонапряженности 40 г и последующего γ -облучения с мощностью дозы 1 Гр/с с поглощенными дозами D_γ : $1 \cdot 10^3$; $5 \cdot 10^3$; $2 \cdot 10^4$; $5 \cdot 10^4$ Гр. После воздействия γ -облучения на смесь, активированную в течение 1 мин. (рисунок 1, а), наблюдается немонотонное снижение и рост интенсивностей главных дифракционных пиков в зависимости от поглощенной дозы. Для смесей, активированных в течение 4 мин. и 7 мин. (рисунок 1, б), наблюдается увеличение интенсивности рефлексов при увеличении дозы поглощения. Увеличение интенсивностей свидетельствуют о повышении кристалличности структуры компонентов смеси в процессе γ -облучения. Аномально уширенные пики косвенно свидетельствуют о сохранении наноструктурного состояния кристаллитов и о наличии остаточных микродеформаций.

При увеличении дозы γ -облучения наблюдаются несистематические колебания параметров межплоскостных расстояний обоих компонентов. Для титана (1 мин. МА) с увеличе-

нием поглощенной дозы происходит незначительное уменьшение межплоскостных расстояний (d). При 4 мин. и 7 мин. МА на малых дозах зависимость носит немонотонный характер, после облучения с дозами $D\gamma = 2 \cdot 10^4$ Гр до $D\gamma = 5 \cdot 10^4$ Гр величины межплоскостных расстояний для 1; 4; 7 мин. МА смесей выравниваются и стремятся к эталонному Ti (1-1197) $d(101) = 22,4$ нм. Аналогичная картина наблюдается и для алюминия (эталон Al (1-1180) $d(200) = 20,24$ нм).

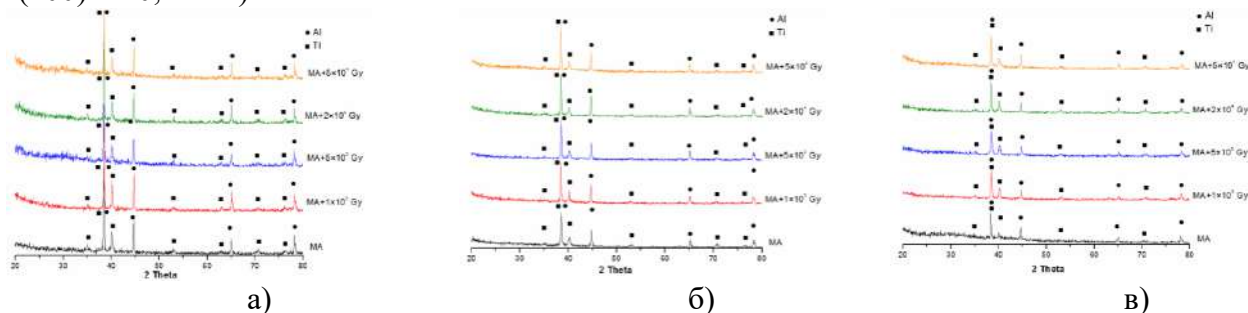


Рисунок 1 – Дифрактограммы порошковых смесей состава Ti (64 мас. %) + Al (36 мас. %), активированных в режимах 1 мин. МА (а), 4 мин. МА (б) и 7 мин. МА (в) при энергонапряженности 40 г после воздействия γ -облучения с величиной доз: $D\gamma = 1 \cdot 10^3$ Гр, $D\gamma = 5 \cdot 10^3$ Гр, $D\gamma = 2 \cdot 10^4$ Гр, $D\gamma = 5 \cdot 10^4$ Гр

Расчет прецизионных параметров облученных механоактивированных образцов показал, что в процессе воздействия γ -облучения происходит изменение структурных состояний компонентов. У титана, механоактивированного в течение 4 мин. и 7 мин. (рисунок 2, а), при воздействии малых доз происходит сжатие решетки, затем решетка увеличивается и снова уменьшается.

При 1 мин. МА для титанового компонента происходит незначительное увеличение объема решетки на малых дозах. После воздействия дозы $D\gamma = 5 \cdot 10^3$ Гр объем решетки уменьшается. При воздействии дозы $D\gamma = 5 \cdot 10^4$ Гр для образцов, механоактивированных в течение 1 мин. и 7 мин., объем решетки титанового компонента близок к эталонному $V_{Ti} = 35221$ нм³. Для алюминиевого компонента (рисунок 2, б) при воздействии дозы $D\gamma = 5 \cdot 10^4$ Гр для образцов, механоактивированных в течение 1 мин. и 7 мин., объемы решеток стремятся к эталонному $V_{Al} = 66492$ нм³. Для 4 мин. МА схожие с эталоном значения наблюдаются при $D\gamma = 2 \cdot 10^4$ Гр.

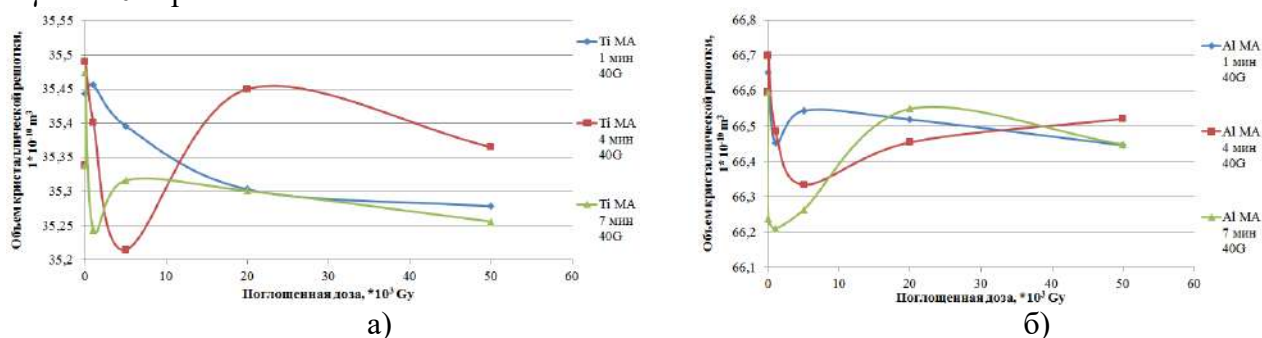


Рисунок 2 – Изменение объемов кристаллических решеток компонентов смеси, механоактивированной при энергонапряженности 40 г, в зависимости от поглощенной дозы

На рисунке 3 приведены дифрактограммы смеси, механоактивированной в течение 1; 4; 7 мин. при энергонапряженности 40 г и последующего γ -облучения с мощностью дозы 0,1 Гр/с с поглощенными дозами $D\gamma$: $1 \cdot 10^3$; $2 \cdot 10^4$ Гр.

Из анализа дифрактограмм следует, что после воздействия γ -облучения увеличивается интенсивность дифракционных отражений обоих компонентов, уменьшается уровень диффузного фона (минимальный при $D\gamma = 1 \cdot 10^3$ Гр).

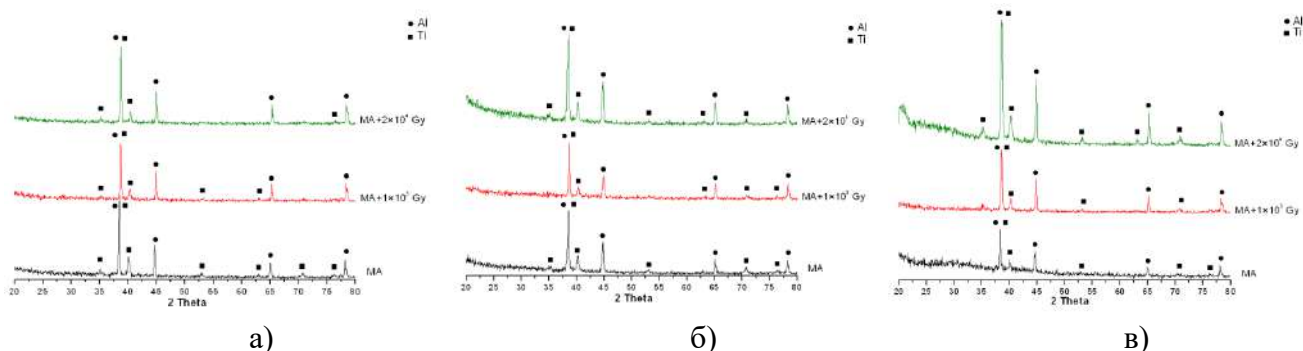


Рисунок 3 – Дифрактограммы порошковых смесей состава Ti (64 мас. %) + Al (36 мас. %), активированных в режимах 1 мин. МА (а), 4 мин. МА (б) и 7 мин. МА (в) при энергонапряженности 40 г, после воздействия γ -облучения с мощностью дозы 0,1 Гр/с с величиной доз: $D\gamma = 1 \cdot 10^3$ Гр, $D\gamma = 2 \cdot 10^4$ Гр

Однако изменение ширины дифракционных отражений для титана на разных временах МА изменяется не систематически в зависимости от поглощенной дозы. Так, при МА в течение 1 мин. и 4 мин. и γ -облучении с $D\gamma = 2 \cdot 10^4$ Гр ПШПВ увеличивается, а для 7 мин. МА на этой дозе происходит уменьшение ПШПВ. Для алюминия на всех временах на большей дозе поглощения ПШПВ незначительно увеличивается (рисунок 4).

Межплоскостные расстояния в зависимости от дозы облучения для Ti (101) изменяются немонотонно. Для Al (200) при 1 мин. и 7 мин. МА, по мере увеличения дозы, происходит уменьшение данного параметра, а при 4 мин. при $D\gamma = 2 \cdot 10^4$ Гр межплоскостные расстояния алюминия увеличиваются (рисунок 8, б).

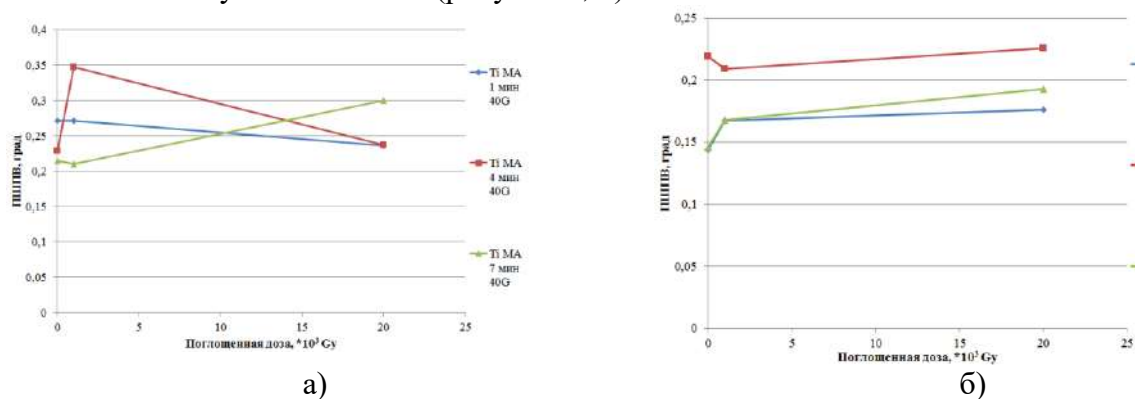


Рисунок 4 – Изменение ПШПВ Ti (101) (а) и Al (200) (б) в смеси, механоактивированной с энергонапряженностью 40 г, в зависимости от поглощенной дозы

У титана для всей серии МА происходит незначительное увеличение средних размеров кристаллитов. Уровень микронапряжений титана для всей серии МА также остается

практически неизменным. У алюминия после механоактивации и облучения с мощностью дозы 0,1 Гр/с средние размеры кристаллитов незначительно снижаются для всех времен МА. Уровень микронапряжений для 1 мин. и 7 мин. МА увеличиваются, для 4 мин. МА наблюдается незначительное снижение.

Выводы

Воздействие γ -облучения с мощностью дозы 0,1 Гр/с и 1 Гр/с при разных временах облучения на механически активированные на разных режимах МА смеси состава Ti (64 мас. %) + Al (36 мас. %) приводит к изменению на микроуровне структурных состояний компонентов смеси. При этом воздействие γ -облучения с мощностью дозы 1 Гр/с оказывает большее влияние на структурные параметры компонентов.

В процессе облучения происходит изменение объемов элементарных ячеек компонентов, среднего размера зерен и микродеформаций. Различный характер изменения параметров кристаллических решеток может быть связан с особенностями взаимодействия излучения с разными материалами [3–6, 7–12]. Также следует отметить, что структурные изменения носят несистематический характер и могут определяться процессами возврата, которые связаны, прежде всего, с высокой скоростью восходящей диффузии радиационно-индуцированных точечных дефектов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что облучение γ -квантами механоактивированных смесей состава Ti + Al приводит к частичному отжигу дефектов, при этом наноразмерный масштаб ОКР кристаллитов сохраняется.

Работа выполнялась в рамках государственного Задания FZMM-2020-0002 и гранта Президента РФ (соглашение 075-15-2020-234).

Список литературы

1. Фазовые превращения при облучении / Под. ред. Л. Н. Быстрова. – Челябинск : Металлургия, 1989. – 312 с.
2. Шалаев, А. М. Радиационно-стимулированная диффузия в металлах / А. М. Шалаев. – М. : Атомиздат, 1972. – 148, с.
3. Мамонтов, А. П. Эффект малых доз ионизирующего излучения / А. П. Мамонтов, И. П. Чернов. – М. : Энергоатомиздат, 2001. – 286 с.
4. Лейман, К. В. Взаимодействие излучения с твердым телом и образование элементарных дефектов / К. В. Лейман. – М. : Атомиздат, 1979. – 296 с.
5. Кирсанов, В. В. Процессы радиационного дефектообразования в металлах / В. В. Кирсанов, А. Л. Суворов, Ю. В. Трушин. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
6. Ибрагимов, Ш. Ш. Радиационные повреждения металлов и сплавов / Ш. Ш. Ибрагимов, В. В. Кирсанов, Ю. С. Пятилетов. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
7. Конобеевский, С. Т. Действие облучения на материалы / С. Т. Конобеевский. – М. : Атомиздат, 1967. – 401 с.
8. Градобоев, А. В. Исследование гетероструктур AlGaInP при облучении гамма-квантами в области перестройки дефектной структуры / А. В. Градобоев, К. Н. Орлова, К. П. Арефьев, И. А. Асанов // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 11–3. – С. 116–119.
9. Loginova, M. V. The Evolution of Structural and Phase States of Titanium Aluminides after γ Irradiation in Small Doses / M. V. Loginova, V. I. Yakovlev, A. A. Sitnikov, A. V. Sobachkin, S. G. Ivanov, A. Z. Negodyaev, A. V. Gradoboev // Physics of Metals and Metallography. – 2017. – Vol. 118. – № 2. – P. 170–175.
10. Шалаев, А. М. Структура и свойства металлов и сплавов. Свойства облученных металлов и сплавов / А. М. Шалаев. – Киев : Наукова Думка, 1985. – 307 с.

11 Андриевский, Р. А. Влияние облучения на свойства наноматериалов [Текст] / Р. А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2010. – Т. 110. – № 3. – С. 243–254.

12 Довбня, А. Н. Влияние электронного облучения на наноструктурное состояние деформированного циркония / А. Н. Довбня, В. А. Мац, В. И. Соколенко // Вопросы атомной науки и техники. – 2012. – № 5. – С. 36–38.

INVESTIGATION OF MECHANICALLY ACTIVATED MIXTURES OF THE TI-AL SYSTEM IRRADIATED WITH GAMMA QUANTA

Sitnikov A. A., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: sitalan@mail.ru

Yakovlev V. I., C.Sc. (Engineering), e-mail: yak1961@yandex.ru

Sobachkin A. V., C.Sc. (Engineering), e-mail: sobalvi@yandex.ru

Loginova M. V., C.Sc. (Engineering), e-mail: logi_m@mail.ru

Myasnikov A. Yu., e-mail: myasnickov.andre@yandex.ru

Syrovezhkin M. R., e-mail: mr.syrovezhkin@yandex.ru

Gradoboev A. V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: gradoboev1@mail.ru

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

Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of SB RAS, 630128, Kutateladze, 18, Novosibirsk, Russian Federation

National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Lenina avenue, 30, Tomsk, Russian Federation

Abstract

Experimental studies were conducted on the irradiation of mechanically activated mixtures of the Ti-Al system with gamma quanta. Powder mixtures of the composition Ti (64 wt. %) + Al (36 wt. %), mechanically activated at different times at an energy stress of the mill 40 g before the formation of an intermetallic phase during mechanical activation. The dose rate of gamma radiation was about 1 Gy/s and 0.1 Gy/s. Changes in the interplane distances of titanium and aluminum, changes in the volumes of crystal lattices, as well as changes in the sizes of crystallites and the level of microstresses in the mechanically activated mixture are shown. The effect of gamma radiation with a dose rate of 0.1 Gy / s and 1 Gy/s at different irradiation times leads to a change at the microlevel of the structural states of the mixture components. At the same time, the effect of gamma radiation with a dose rate of 1 Gy/s has a greater effect on the structural parameters of the components.

Keywords: gamma irradiation, mechanical activation, X-ray phase analysis, powder mixture, intermetallides, titanium aluminides, titanium, aluminum.

УДК 536.621.9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШТУЧНОЙ ПЛОТНОСТИ АБРАЗИВНОГО МАТЕРИАЛА

*ФЕДОТОВ Виктор Васильевич.*¹, заместитель директора по общим вопросам,
e-mail:tms10@yandex.ru*

*ОСИПОВ А.П.¹, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Технология
машиностроения», e-mail:12345655@mail.ru*

*КИСЕЛЁВ Е.С.², доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные
технологии в машиностроении», e-mail:kec.ulstu@mail.ru*

¹Филиал «Самарского государственного технического университета» в г. Сызрани, 446001, Российская Федерация, г. Сызрань, ул. Советская, 45

²«Ульяновский государственный технический университет», 432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

Аннотация

В статье рассмотрена методика экспериментального определения штучной плотности абразивного материала. Применение данного параметра при математическом моделировании процесса шлифования помогает исключить влияние формы и размеров абразивных зерен на результаты расчетов силовых, температурных и качественных характеристик шлифовального круга. Авторы экспериментально оценили значение параметра штучной плотности в зависимости от марки абразивного материала, его зернистости, сопоставили полученные результаты с результатами других исследователей. Для автоматизации процесса определения количества зерен в навеске применялась программа ResFraction. Экспериментальные значения штучной плотности будут использованы для определения количества абразивных зерен, находящихся на рабочей поверхности шлифовального круга. Дальнейшие разработки направлены на составление нормативных баз данных для использования в инженерных расчетах.

Ключевые слова: абразивный материал, штучная плотность, насыпная плотность, количество зерен, масса абразива, взвешивание, насыпка абразивных зерен.

Введение

Основная тенденция развития современного машиностроения это снижение себестоимости изготовления продукции за счет автоматизации производственного процесса путем применения оборудования с ЧПУ, новых металлорежущих инструментов и универсальной оснастки. Автоматизация средств технологического оснащения механической обработки заготовок путем модернизации позволяет существенно повысить производительность и качество обрабатываемых поверхностей. Но все мероприятия данного направления требуют значительных капиталовложений. Поэтому себестоимость механической обработки, как правило, снижается незначительно, и даже в ряде случаев имеет тенденцию к увеличению.

До последнего времени, шлифование активно использовалось в качестве заключительного этапа обработки закаленных заготовок для достижения требуемого уровня качества поверхности изготавливаемой детали. В настоящее время, в связи с широким использованием ультра мелкодисперсного твердосплавного инструмента и современных высокопроизводи-

тельных обрабатывающих центров с короткими кинематическими цепями, существует распространенное суждение, что процесс шлифования - устаревший способ механической обработки. Однако, из-за низкой стоимости шлифовальных операций, а так же широких возможностей использования, в условиях применения современных технологий полностью отказаться от абразивной обработки не представляется возможным. В связи с этим для повышения конкурентоспособности данного метода механической обработки необходимо усовершенствование самого процесса шлифования. Одним из путей понижения себестоимости шлифовальной обработки является прогнозирование и контроль конечных результатов параметров качества. Достигнуть этого возможно при условии адекватного моделирования процесса шлифования. Необходимо, взяв за основу входные данные обработки, определять тематические зависимости силовых и температурных характеристик процесса, а также некоторых показателей качества обрабатываемых поверхностей. Определяющими исходными данными шлифовальной операции являются технические и размерные характеристики абразивного инструмента, которые существенно влияют на число абразивных зерен, находящихся на рабочей поверхности круга, и, соответственно, на количество режущих кромок одновременно принимающих участие в процессе резания. Используя соотношение основных элементов шлифовального круга, а именно абразивного материала, связки и пор, возможно рассчитать объем каждой составляющей в структуре абразивного инструмента. В литературных источниках имеется информация только по величине объема абразивного материала в круге, что не позволяет определить количество в инструменте абразивных зерен с режущими кромками, участвующими непосредственно в съеме припуска. Учитывая данную проблему, большинство исследователей [1,2,3] для определения числа режущих кромок использовали характеристику насыпной плотности, которая определялась экспериментально. Физический смысл ее заключается в величине массы абразивного материала, находящейся в единице объема круга. Значения параметра насыпной плотности у различных исследователей сильно отличаются в достаточно широком диапазоне, что объясняется различной ориентацией зерен сложной формы в пространстве, а так же неоднородностью форм и размеров абразивных зерен в рамках одной зернистости абразивного материала.

Описание теоретических и экспериментальных исследований

В связи с вышеизложенным предлагается для расчета количества режущих кромок абразивных зерен, находящихся на рабочей поверхности абразивного инструмента, заменить параметр насыпной плотности на штучную. Штучная плотность – это характеристика, определяющая число абразивных зерен, находящихся в единице массы шлифовального материала. Впервые для определения эксплуатационных характеристик рабочей поверхности шлифовального инструмента количество зерен в 1 грамме применил Маслов Е.Н. [4]. Применение параметра «штучная плотность при построении математической модели процесса шлифования исключает влияние размеров абразивных зерен и их формы на результаты инженерных расчетов, что позволяет частично исключить зависимость характеристик шлифовального круга на температурные, силовые и качественные показатели процесса механической обработки.

Целью исследования является экспериментальное определение параметра реальной штучной плотности различных абразивных материалов и составление по полученным результатам итоговых сводных таблиц.

На первом этапе работ было проведено изготовление образцов в виде насыпки зёрен абразивного материала на белом листе бумаги.

К образцам предъявлялись следующие требования:

XII Международная научно – практическая конференция
«Инновации в машиностроении»

XII International scientific and practical conference «Innovations in mechanical engineering»

- расположение зёрен в строго ограниченной области, что существенно упрощает процесс фотографирования;
- равномерное распределение зёрен на образце, что необходимо для удобства их подсчёта и уменьшения погрешности эксперимента;
- число зёрен, используемых в эксперименте, должно обеспечить случайную погрешность исследования не более 5%.

Для выполнения последнего требования к образцу разработана методика оценочного расчёта количества зерен, необходимых для проведения эксперимента с различными абразивными материалами и их зернистостью.

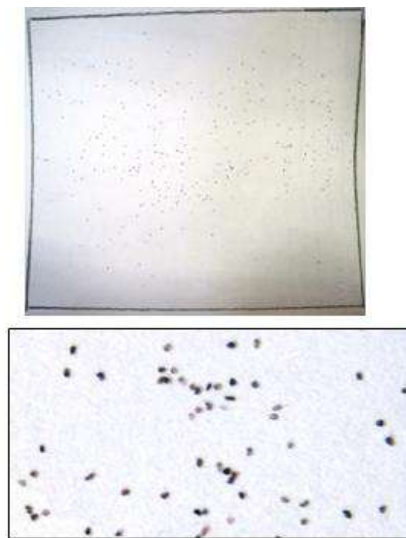


Рисунок 1 – Образцы насыпок абразивных зерен

Расчет построен на основе определения количества абразивных зерен, приходящихся на массу абразивного вещества, соответствующую величине погрешности измерения экспериментальных весов.

$$m_{абр} = \delta, \quad (1)$$

где δ - величина погрешности цифровых весов.

Масса абразива определяется:

$$m_{абр} = V_{абр} \cdot \rho_{абр}, \quad (2)$$

где $V_{абр}$ – объем абразивного материала;

$\rho_{абр}$ – плотность абразива.

Объем абразивного вещества ($V_{абр}$) определяется объемом ($V_{зерн}$) и количеством (n) абразивных зерен. Объем зерна при моделировании его сферой:

$$V_{абр} = V_{зерн} \cdot n = \frac{4}{3} \pi d_{зерн}^3 n, \quad (3)$$

где $d_{зерн}$ – величина диаметра сферы, описывающей абразивное зерно зернистостью ($N_{зерн}$).

$$d_{зерн} = 10,6 N_{зерн}. \quad (4)$$

В итоге получаем число зерен ($n_{nozр}$) в массе абразивного материала, соответствующую значению погрешности цифровых весов:

$$n_{nozр} = \frac{\delta}{44,4 \cdot \rho_{абр} \cdot N_{зерн}} \quad (5)$$

Минимальное число зерен ($n_{экс}$), необходимых для эксперимента с использованием различных абразивных материалов и с разным номером зернистости, рассчитывается из пропорции:

$$n_{nozр} = 5\%, n_{экс} = 100\%$$

В результате получим:

$$n_{экс} = \frac{\delta}{2,22 \cdot \rho_{абр} \cdot N_{зерн}} \quad (6)$$

На следующем этапе эксперимента осуществлялось фотографирование полученных образцов с помощью цифрового фотоаппарата Digital IXUS 95 IS. Для каждой марки абразивного материала и различного номера его зернистости было изготовлено по 30 фотографий. Сфотографированные зёрна были объединены в навески для взвешивания по 10 фотографий в каждой.

Пересчет абразивных зерен в эксперименте проводился с помощью программной системы ResFraction, интерфейс которой и последовательность процесса подсчёта представлены на рисунке 2.

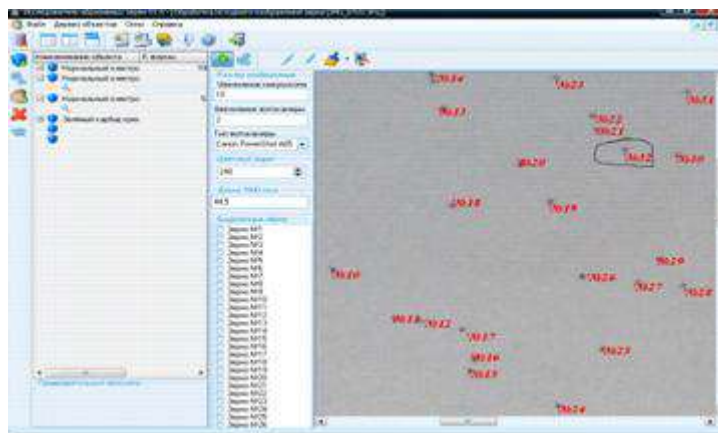


Рисунок 2 – Подсчет зерен в программе ResFraction

Взвешивание образцов проводилось на лабораторных весах серии AND EK-300i, предназначенных для процесса измерения массы различных материалов в научно-исследовательских лабораториях.

По результатам осуществленных этапов эксперимента полученные данные были сведены в таблицу 1, содержащую информацию о величине массы образцов и о количестве подсчитанных в них абразивных зерен.

Значения массы образцов и количества в них зерен, представленные в таблице 1, использовались для расчёта штучной плотности.

Таблица 1 – Результаты эксперимента для образцов карбида кремния 53С зернистостью F80

Материал	Зернистость	Номер образца	Масса образца	Номер фотографии	Количество зерен
Карбид кремния чёрный 53С	F80(16)	(6-1)	0,07	693	278
				694	498
				695	674
				696	269
				697	226
				698	646
				699	776
				700	836
				701	1307
				702	1629
				Итого	7139
		(6-2)	0,07	703	248
				704	213
				705	261
				706	352
				707	569
				708	849
				709	866
				710	649
				711	798
				712	1208
				Итого	6013
		(6-3)	0,06	713	138
				714	276
				715	463
				716	676
				717	542
				718	379
				719	362
				720	802
				721	792
				722	651
		Итого	0,2	Итого	5081
		Итого суммарное	18233		

Значение штучной плотности рассчитывается по математической зависимости:

$$\rho_{шт} = \frac{n_{экс}}{m_{обр}}. \quad (7)$$

Результаты и обсуждения

Значения штучной плотности, полученные в рамках проведенных экспериментов сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Сводная таблица расчетных и экспериментальных значений штучной плотности

Зернистость	Средний размер зерна, см	Объем одного зерна, см ³	Масса одного зерна, г		Кол-во зерен в 1 г		Масса 1600 зерен		Масса 500 зерен		Кол-во зерен в 1 г эксперимент			
			Al ₂ O ₃	SiC	Al ₂ O ₃	SiC	Al ₂ O ₃	SiC	Al ₂ O ₃	SiC	Al ₂ O ₃	SiC 63C	SiC 53C	
Зерно-куб														
8	0,0085	6,10E-07	2,41E-06	1,95E-06	415160	512463	0,004	0,003	0,001	0,001				
10	0,0106	1,19E-06	4,70E-06	3,81E-06	212562	262381	0,008	0,006	0,002	0,002				
12	0,0127	2,06E-06	8,13E-06	6,59E-06	123010	151841	0,013	0,011	0,004	0,003				
16	0,0170	4,88E-06	1,93E-05	1,56E-05	51895	64058	0,031	0,025	0,010	0,008		84350	90856	
20	0,0212	9,53E-06	3,76E-05	3,05E-05	26570	32798	0,060	0,049	0,019	0,015	37055	37028	43643	
25	0,0265	1,86E-05	7,35E-05	5,96E-05	13604	16792	0,118	0,095	0,037	0,030		26409	24525	
32	0,0339	3,90E-05	1,54E-04	1,25E-04	6487	8007	0,247	0,200	0,077	0,062	12863	18173	16835	
40	0,0424	7,62E-05	3,01E-04	2,44E-04	3321	4100	0,482	0,390	0,151	0,122	4524	5480	8663	
50	0,0530	1,49E-04	5,88E-04	4,76E-04	1700	2099	0,941	0,762	0,294	0,238		5359	2960	
63	0,0668	2,98E-04	1,18E-03	9,53E-04	850	1049	1,882	1,525	0,588	0,476		1919	2007	
80	0,0848	6,10E-04	2,41E-03	1,95E-03	415	512	3,854	3,122	1,204	0,976	542			
100	0,1060	1,19E-03	4,70E-03	3,81E-03	213	262	7,527	6,098	2,352	1,906	337			
125	0,1325	2,33E-03	9,19E-03	7,44E-03	109	134	14,702	11,910	4,594	3,722	157			
Зерно-сфера														
8	0,0085	3,19E-07	1,26E-06	1,02E-06	792897	978732	0,002	0,002	0,001	0,001				
10	0,0106	6,24E-07	2,46E-06	2,00E-06	405963	501111	0,004	0,003	0,001	0,001				
12	0,0127	1,08E-06	4,26E-06	3,45E-06	234932	289995	0,007	0,006	0,002	0,002				
16	0,0170	2,55E-06	1,01E-05	8,17E-06	99112	122342	0,016	0,013	0,005	0,004		84350	90856	
20	0,0212	4,99E-06	1,97E-05	1,60E-05	50745	62639	0,032	0,026	0,010	0,008	37055	37028	43643	
25	0,0265	9,74E-06	3,85E-05	3,12E-05	25982	32071	0,062	0,050	0,019	0,016		26409	24525	
32	0,0339	2,04E-05	8,07E-05	6,54E-05	12389	15293	0,129	0,105	0,040	0,033	12863	18173	16835	
40	0,0424	3,99E-05	1,58E-04	1,28E-04	6343	7830	0,252	0,204	0,079	0,064	4524	5480	8663	
50	0,0530	7,80E-05	3,08E-04	2,49E-04	3248	4009	0,493	0,399	0,154	0,125			2960	
63	0,0668	1,56E-04	6,16E-04	4,99E-04	1624	2004	0,985	0,798	0,308	0,249		1919	2007	
80	0,0848	3,19E-04	1,26E-03	1,02E-03	793	979	2,018	1,635	0,631	0,511	542			
100	0,1060	6,24E-04	2,46E-03	2,00E-03	406	501	3,941	3,193	1,232	0,998	337			
125	0,1325	1,22E-03	4,81E-03	3,90E-03	208	257	7,698	6,236	2,406	1,949	157			

На ряду с экспериментальными результатами в ней приведены расчётные данные, полученные в процессе построения модели абразивных зёрен в форме сферы и куба.

Эксперимент для различных абразивных материалов и их зернистости проводился в несколько этапов, поэтому необходимо обработать полученные значения штучной плотности методами статистического анализа.

Среднее арифметическое значение штучной плотности рассчитали по математической зависимости:

$$\bar{\rho}_{um} = \frac{\sum_{i=1}^k \rho_{um.i}}{k}, \quad (8)$$

где $\rho_{um.i}$ – параметр штучной плотности для i -того эксперимента,
 k – количество экспериментов.

Для оценки распределения результатов произведен расчет значения дисперсии:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (\rho_{um.i} - \bar{\rho}_{um})^2}{k}. \quad (9)$$

Определим отклонения каждого результата параметра штучной плотности от её среднего значения. С этой целью рассчитаем значение среднего квадратического отклонения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (\rho_{um.i} - \bar{\rho}_{um})^2}{k}}. \quad (10)$$

Определение величины разброса относительных величин осуществляется путем расчета коэффициента вариации:

$$V_{\sigma} = \frac{\sigma}{\bar{\rho}_{um}} \cdot 100\%. \quad (11)$$

Результаты статистического расчета были сведены в таблицу 3.

По значениям штучной плотности, полученным в результате эксперимента, построили графические зависимости расчетных и экспериментальных данных штучной плотности от зернистости абразивного материала для электрокорунда 14А (рис.5), карбида кремния 63 С (рис.6) и 53С (рис.7).

По данным [5] значение штучной плотности для абразивных зерен зернистостью от 12 до 40 составляет порядка $10^4 \dots 10^5$ шт./г. Полученные по итогам проведенного эксперимента результаты укладываются в приведенный выше диапазон значений.

Таблица 3 – Результаты статистического анализа

Материал	Зернистость	Дисперсия	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации
Электрокорунд нормальный 14А	F70(20)	8664904,2	2943,6	7,94%
	F54(32)	7767,2	88,13	0,69%
	F40(40)	25792,7	160,6	3,55%
	F24(80)	75,1	8,7	1,6%
	100	39,74	6,3	1,87%
	125	5,6	2,4	1,53%
Карбид кремния 63С	F80(16)	32096420,5	5665,4	6,72%
	F70(20)	17069030	4131,5	11,16%
	F60(25)	5595375,1	2448,5	9,2%
	F54(32)	453062,8	673,1	3,7%
	F40(40)	35370,1	188,1	3,43%
	F36(50)	66188,6	257,3	4,8%
	F30(63)	3742,4	61,2	3,2%
Карбид кремния 53С	F80(16)	64202679,9	8012,7	8,82%
	F70(20)	55820422,33	7471,31	17,1%
	F60(25)	25792,7	160,6	3,55%
	F54(32)	151638	389	2,31%
	F40(40)	72530,2	269,3	3,1%
	F36(50)	8070	89,8	3,03%
	F30(63)	1348,1	36,7	1,83%



Рисунок 5 – Графическая зависимость штучной плотности от зернистости электрокорунда нормального 14А

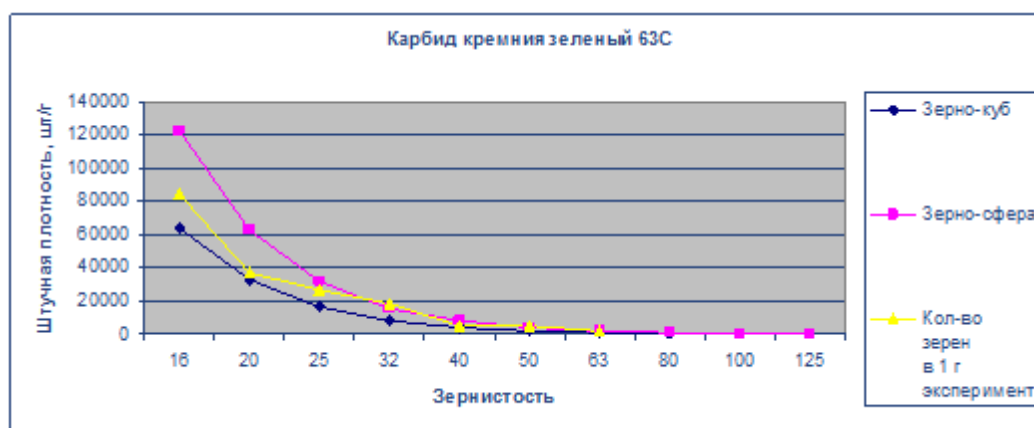


Рисунок 6 – Графическая зависимость штучной плотности от зернистости карбида кремния 63С

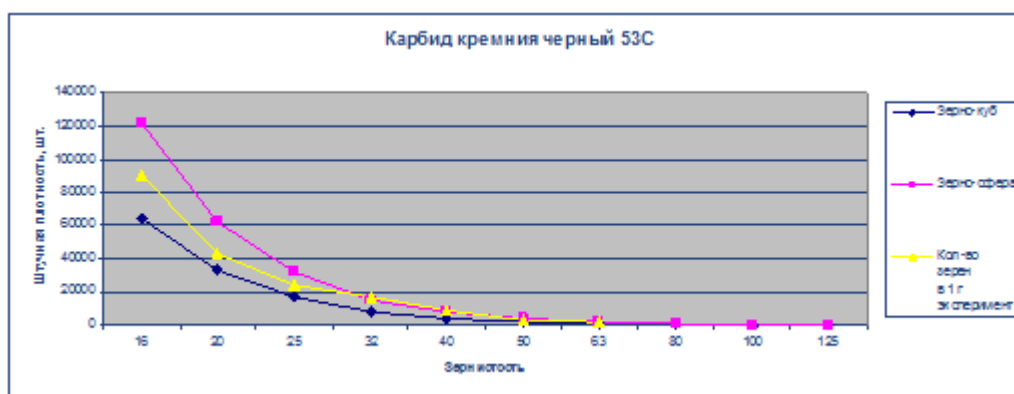


Рисунок 7 – Графическая зависимость штучной плотности от зернистости карбида кремния 53С

Выводы

На основании результатов эксперимента и построенных графических зависимостей сформулированы следующие выводы:

1. Число абразивных зерен в единице массы при увеличении зернистости уменьшается, что связано с ростом их геометрических размеров и подтверждает адекватность результатов эксперимента.

2. Экспериментальные значения штучной плотности находятся в границах диапазона, ограниченного величинами, которые рассчитаны на основании моделирования абразивного зерна кубом и сферой. При этом постоянно сохраняется динамика, при которой параметр штучной плотности больше расчетного её значения по кубу и меньше расчетной величины по сфере.

3. Несовпадение результатов эксперимента с расчетными данными штучной плотности говорит о несовершенстве моделирования зерен различными геометрическими фигурами, не учитывающего реальную неправильную форму абразивных зерен.

4. Экспериментальные значения штучной плотности предполагается использовать для инженерных расчетов количества абразивных зерен, находящихся на рабочей поверхности шлифовального круга.

5. Результаты эксперимента позволяют эффективно моделировать силовые, температурные характеристики процесса шлифования, а также параметры качества обработанных поверхностей деталей.

Список литературы

1. Курдюков В.И. Основы абразивной обработки: учебное пособие. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2014. 195 с.
2. Гаршин, А. П. Материаловедение. В 3 т. Том 1. Абразивные материалы : учебник для академического бакалавриата / А. П. Гаршин, С. М. Федотова ; под общ. ред. А. П. Гаршина. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016. — 214 с. — Серия : Университеты России.
3. Полканов Е. Г., Горин Н. А. Прогнозирование прочности шлифовального круга по прочности исходной абразивной массы /Современные тенденции технических наук: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Казань, октябрь 2014 г.). – Казань: Бук, 2014. – с. 53-55
4. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
5. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с., ил.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE ABRASIVE MATERIAL REAL UNIT DENSITY

FEDOTOV Viktor Vasilyevich.^{* 1}, General Issues Deputy Director, e-mail: tms10@yandex.ru
Osipov A. P. ¹, Candidate of Technical Sciences, "Mechanical Engineering Technology" Chair Head, e-mail:12345655@mail.ru
Kiselev E. S. ², Doctor of Technical Sciences, "Mechanical Engineering Innovative Technologies" Chair Professor, e-mail:kec.ulstu@mail.ru

¹ Syzran branch of "Samara State Technical University", 446001, Russian Federation, Syzran, Sovetskaya str., 45

² "Ulyanovsk State Technical University", 32 Severny Venets str., Ulyanovsk, 432027, Russia

Annotation

The article considers the experimental determination method of the abrasive material real unit density. The use of this parameter in the grinding process mathematical modeling helps to eliminate the abrasive grains shape and size influence on the calculation results of grinding wheel power, temperature and quality characteristics. The authors experimentally evaluated the unit density parameter value depending on the abrasive material brand and grain size. They compared the results obtained with the other researchers' results. The ResFraction program was used to automate the number of grains determination process in the suspension. The experimental values of the unit density will be used to determine the abrasive grains number located on the grinding wheel working surface. Further developments will be aimed at regulatory databases compiling for engineering calculations.

Keywords: abrasive material, unit density, bulk density, grains number, abrasive mass, weighing, filling of abrasive grains.

УДК 678.5.046

**ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСА
2,3,5-ТРИФЕНИЛТЕТРАЗОЛИЯ ХЛОРИСТОГО С БРОМИДОМ МЕДИ (II) В
РЕАКЦИИ ОТВЕРЖДЕНИЯ ЭПОКСИВИНИЛЭФИРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО**

*ПРОЦЕНКО Александр Евгеньевич, кандидат техн. наук,
e-mail: protsenko.ae@yandex.ru*

*ПРОЦЕНКО Александра Николаевна, кандидат хим. наук,
e-mail: protsenko.chem@gmail.com*

*ШАКИРОВА Ольга Григорьевна, доктор хим. наук, доцент,
e-mail: shakirova_olga@mail.ru*

*ПЕТРОВ Виктор Викторович, доктор техн. наук, профессор,
e-mail: petrovpng@mail.ru*

МАЛЫШЕВА Дарья Павловна, аспирант, e-mail: daryareshet@mail.ru

ЖЕЛЕВСКАЯ Дарья Денисовна, студент, e-mail: darya.zhelevskaya@yandex.ru

Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Российская Федерация, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27

Аннотация

Приведены результаты исследования каталитической системы на основе 2,3,5-трифенилтетразолия хлористого с бромидом меди (II) (ТХБМ). Установлено время гелеобразования, которое составило 90-100 минут. Исследована термостабильность полученного связующего с использованием методов термического анализа. Определена энергия активации системы по данным дифференциальной сканирующей калориметрии. Данные разработки могут применяться в производстве крупногабаритных изделий из ПКМ методом вакуумной инфузии.

Ключевые слова: время жизни, связующее, катализатор, полимерный композиционный материал, энергия активации

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) нашли широкое применение в различных отраслях машиностроения [1–4]. Большой спрос на данные материалы привел к появлению большого количества технологий их производства. На сегодняшний день все технологии производства ПКМ можно разделить на две большие группы это автоклавные и безавтоклавные методы производства [5]. Использование первых гарантирует лучшие физико-механические свойства будущего изделия за счет использования повышенного давления и связующих систем, отверждаемых при повышенных температурах [6]. Однако, большая стоимость капитальных вложений в оборудование и оснастку являются большим недостатком данного метода.

Применение безавтоклавных технологий, например, таких как вакуумная инфузия [7], значительно удешевляет процесс производства ПКМ. До недавнего времени метод не получал широкого распространения, так как требовал разработки специальных систем связующих, которые после отверждения не уступали бы по свойствам автоклавным системам. Современные системы холодного отверждения удовлетворяют этим требованиям.

Одно из направлений использования безавтоклавных технологий – получение крупногабаритных изделий, например корпус судна. При получении изделия с большим водоизмещением и толщиной корпуса свыше 10 мм может потребоваться значительное время на пропитку сухого армирующего наполнителя. Иногда данный процесс может превышать время жизни связующего. В этом случае рекомендуется вводить ингибиторы процесса отверждения, например, 2,4 – пентандион для эпоксивинилэфирных систем. При этом происходит усложнение рецептуры и как показывает практика не всегда удается достичь заданных временных интервалов жизни связующего.

Вследствие, интерес представляют каталитические системы время гелеобразования которых будет свыше 60 минут.

Материалы и методы

Материалы

Ввиду широко распространения среди связующих холодного отверждения эпоксивинилэфирных систем, сочетающих в себе достоинства эпоксидных и полиэфирных смол была выбрана смола Derakane Momentum 411-350. Стандартная система отверждения включает 100 мас. ч. смолы, 2 масс. ч. катализатора – октоата кобальта (NL-49P), 2 мас. ч. инициатора – метилэтилкетон пероксид (Butanox M-50).

Методы

Термоанализ образцов материалов проводился на приборе синхронного термического анализа NETZSCH STA 409 PC Luxx в коррундовых тиглях в атмосфере воздуха. Скорость нагрева составляла 10 К/мин. В кинетических исследованиях по методу Киссенджера [8] использовались также скорости нагрева 2,5 К/мин и 5 К/мин.

Результаты и обсуждения

В качестве катализатора использовалось координационное соединение 2,3,5-трифенилтетразолия хлористого с бромидом меди (II) (ТХБМ) основные свойства и синтез которого представлен в работе [9]. В данном исследовании ТХБМ использовался в виде 5 % раствора в смеси стирола и диметилсульфоксида. Раствор ТХБМ в количестве 2 мас. ч. вводился в 100 масс. ч. смолы Derakane Momentum 411-350, после чего вводился инициатор отверждения Butanox M-50 (2 масс. ч.). Время гелеобразования полученной системы составило 90–100 минут. Полное отверждение наступило спустя 200 минут. При этом образец, содержащий в качестве ускорителя NL-49P полностью отвердился за 38 минут.

По данным термического анализа (рисунок 1) образец смолы, отвержденный в присутствии ТХБМ в диапазоне температур до 200 °С также термически стабилен, как и эталонный образец, содержащий октоат кобальта 2 %. Свыше 200 °С исследуемый образец проявляет более высокую термостойкость до 340 °С, после чего происходит термодеструкция отвержденных связующих. По данным ДСК образец смолы, отвержденный в присутствии ТХБМ, обладает меньшим экзотермическим эффектом, чем образец сравнения.

С целью подтверждения, что катализатор ТХБМ обладает каталитической активностью, проводилась серия экспериментов по установлению энергии активации с использованием метода Киссенджера.

ДСК данные необходимые для расчета энергии активации представлены на рисунке 2.

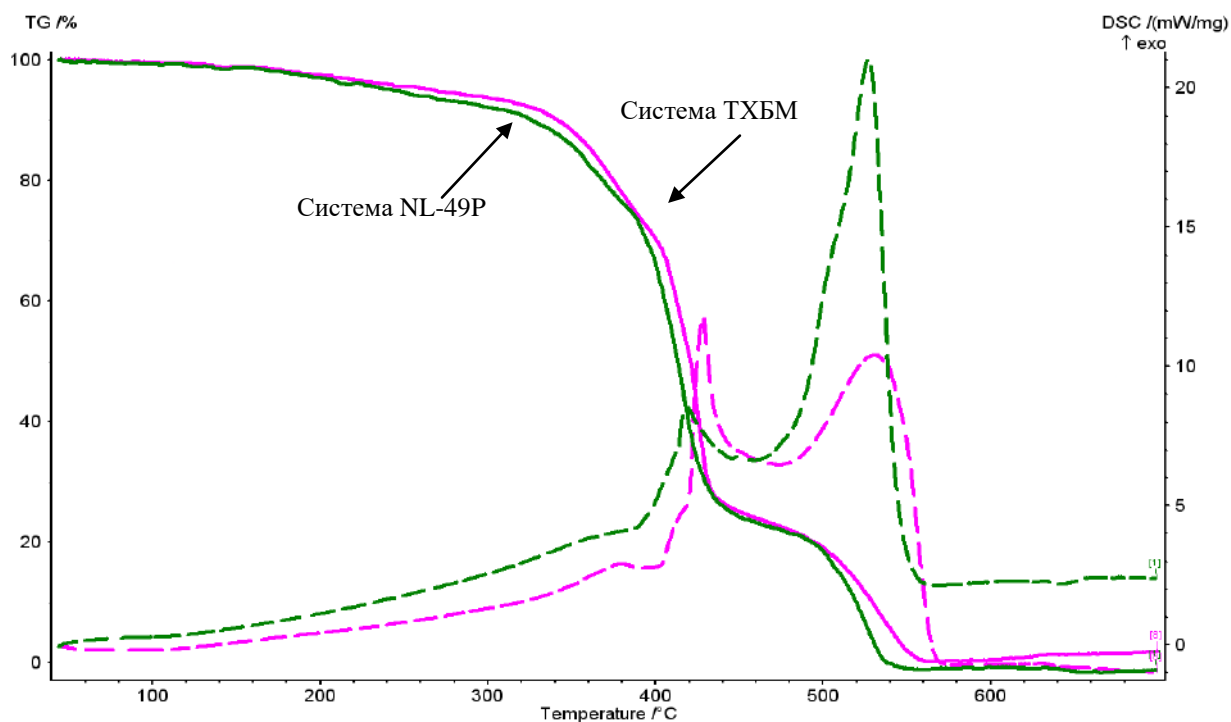


Рисунок 1 – Термоанализ связующих (--- TG, - - - - - DSC)

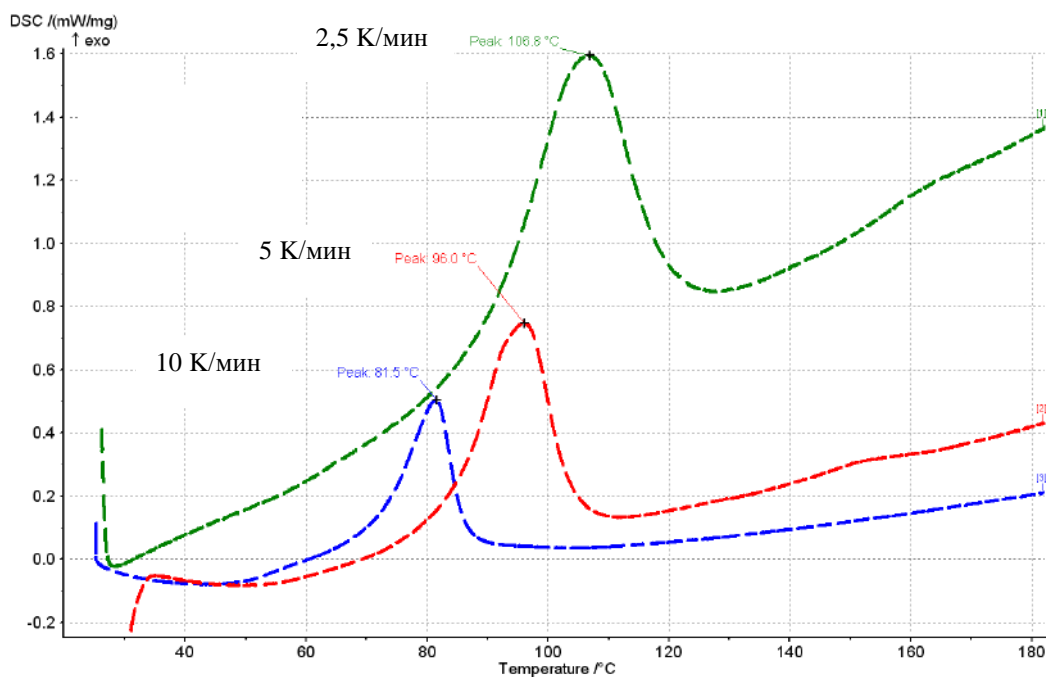


Рисунок 2 – Термограмма связующего Derakane Momentum 411-350 в присутствии ТХБМ при скоростях 2,5, 5 и 10 К/мин

Для расчета энергии активации отверждения каталитической системы необходимы температуры ДСК пиков, полученных при различных скоростях нагрева. Расчетные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результат эксперимента со связующим, содержащим катализатор ТХБМ

Температура, К	Скорость нагрева	$\ln(v/T^2)$	$1000/T$
354,65	2,5	-10,83	2,82
369,15	5	-10,21	2,71
379,95	10	-9,58	2,63

На основании полученных данных строился график, представленный на рисунке 3.

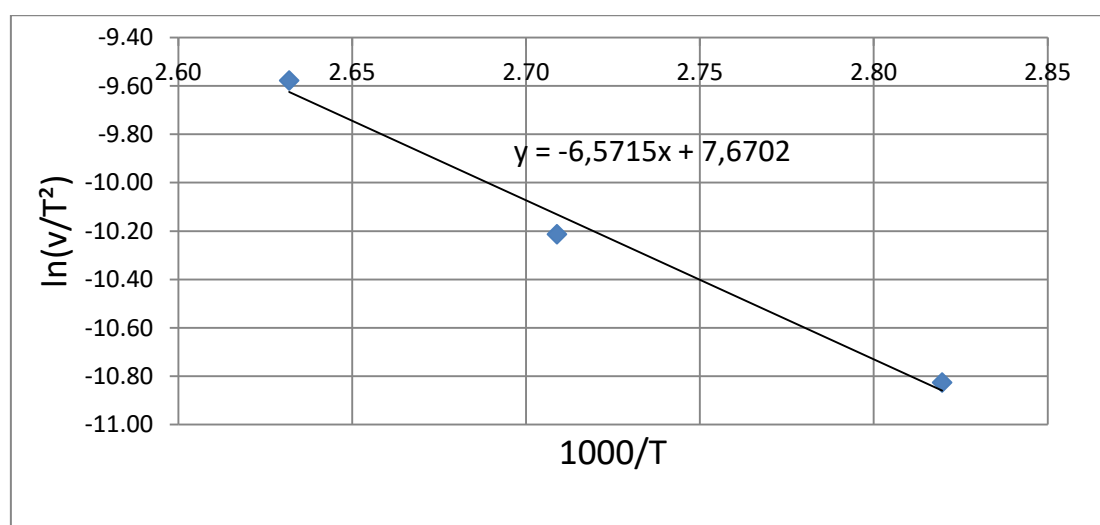


Рисунок 3 – График зависимости Киссенджера

В соответствии с методикой необходимо определить тангенс угла наклона. Энергия активации рассчитывается по уравнению:

$$E_a = -R \cdot \text{tg}(\alpha)$$

где tg – тангенс угла наклона кривой,

R – универсальная газовая постоянная 8,314, Дж/(К·моль)

Таким образом энергия активации отверждения эпоксивинилэфирного связующего Derakane Momentum 411-350 в присутствии ТБХМ составляет 54,7 кДж/моль.

По данной методике также была найдена энергия активации системы, принятой за стандартную, которая составила 31 кДж/моль.

Таким образом экспериментально установлено, что ТХБМ обладает каталитической активностью. В следствии более высокой энергии активации связующее сохраняет способность к переработке в течение более длительного времени.

Выводы

ТБХМ может применяться как катализатор отверждения эпоксивинилэфирных связующих в нормальных условиях. Время жизни системы составляет 90 – 100 минут, что достаточно для пропитки крупногабаритных изделий. Расширение номенклатуры каталитических систем позволит точнее подбирать рецептуры связующих для конкретной производственной задачи. В дальнейшем необходимо провести анализ влияния ТБХМ на физико-механические свойства ПКМ.

Список литературы

1. Balıkoğlu F. et al. Mechanical performance of marine sandwich composites subjected to flatwise compression and flexural loading: Effect of resin pins // *J. Sandw. Struct. Mater.* 2018.
2. Erenkov O.Y., Ivakhnenko A.G., Radchenko M. V. Method for molding fibreglass objects based on polymer binder electrophysical treatment // *Chem. Pet. Eng. Springer*, 2013. Vol. 49, № 5–6. P. 346–350.
3. Erenkov O.Y., Shepeleva E.S., Khimulin S.N. Effect of polymer binder vibration treatment on fiberglass plastic strength // *Chem. Pet. Eng. Springer*, 2011. Vol. 47, № 1. P. 148–153
4. Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction // *Prog. Aerosp. Sci.* 2005. Vol. 41, № 2. P. 143–151.
5. Postnova M.V., Postnov V.I. Development experience out-of-autoclave methods of formation pcm // *Proc. VIAM. FSUE All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials*, 2014. Vol. 0, № 4. P. 6–6.
6. Bashkov O. V. et al. Diagnostics of glass fiber reinforced polymers and comparative analysis of their fabrication techniques with the use of acoustic emission // *AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics Inc.*, 2016. Vol. 1783, № 1. P. 020012.
7. Dai J., Pellaton D., Hahn H.T. A Comparative Study of Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) for Sandwich Panels. 2003. Vol. 24, № 6. P. 672–685.
8. Slopiecka K., Bartocci P., Fantozzi F. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis // *Appl. Energy. Elsevier*, 2012. Vol. 97. P. 491–497.
9. Проценко А.Н., Шакирова О.Г. Получение и характеристика кристаллических галокупратов(II) 2,3,5-трифенилтетразолия // *Вестник Кузбасского государственного технического университета. Государственное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»*, 2017. № 1 (118).

**RESEARCH OF THE CATALYTIC ACTIVITY OF THE COMPLEX OF
2,3,5-TRIPHENYLTETRAZOLIUM CHLORIDE WITH COPPER (II) BROMIDE IN
THE EPOXY VINYL ESTER RESIN CURING REACTION**

Protsenko A.E., Ph.D. (Engineering), e-mail: protsenko.ae@yandex.ru

Protsenko A.N., Ph. D. (Chemistry), e-mail: protsenko.chem@gmail.com

Shakirova O.G., Sc. D. (Chemistry), e-mail: shakirova_olga@mail.ru

Petrov V.V., Sc. D. (Engineering), e-mail: petrovpng@mail.ru

Malysheva D.P., e-mail: daryareshet@mail.ru

Zhelevskaya D.D., e-mail: darya.zhelevskaya@yandex.ru

Komsomolsk-na-Amure State University, 681013, Russian Federation, Komsomolsk-on-Amur,
Lenin Ave. 27

Abstract

The results of a study of a catalytic system based on 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride with copper (II) bromide (TCCB) are presented. The gelation time was determined, which was 90-100 minutes. The thermal stability of the obtained binder was investigated using the methods of thermal analysis. The activation energy of the system was determined from the data of differential scanning calorimetry. These developments can be used in the production of large-sized PCM products by vacuum infusion.

Keywords: lifetime, binder, catalyst, polymer composite material, activation energy.

УДК 620.178

**МОДЕЛИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ
ПУТЕМ АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА, ПРИ ИХ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ
ЖЕСТКИМ ИНДЕНТОРОМ**

*ПРОТАСЕНЯ Татьяна Анатольевна¹, кандидат техн. наук,
e-mail: 5657397@gmail.com*

*КРЕНЬ Александр Петрович¹, доктор техн. наук, доцент,
e-mail: 7623300@gmail.com*

¹Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси», 220072, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Академическая, 16

Аннотация

Разработаны модели упругопластического деформирования, позволяющие по параметрам диаграммы ударного нагружения материала сферическим, пирамидальным и клиновидным инденторами определить твердость и модуль упругости как изотропных полимерных композиционных материалов, так и анизотропных с учетом их структурной неоднородности. Предложенные модели контактного взаимодействия являются основой для разработки методик контроля физико-механических характеристик материалов, полученных путем 3D-печати по различным технологиям с последующей реализацией в портативной измерительной аппаратуре.

Ключевые слова: модели контактного взаимодействия, контроль, индентирование, аддитивный синтез, твердость, модуль упругости, полимерные композиты.

Введение

Современным трендом практически всех отраслей промышленности является применение аддитивных технологий. Создание функциональных деталей сложной геометрии с помощью 3D-печати в настоящее время востребовано не только в автомобиле- и машиностроении, но и науке, образовании, медицине и многих других сферах. Как правило экономически оправдано применение аддитивного синтеза при быстром прототипировании либо высокоточном изготовлении ответственных изделий штучного и мелкосерийного производства. Технология послойного построения изделий из различного вида материалов (жидких фотополимеров, металлических порошков, полиамидов и т.д.) позволяет не только изготовить детали любой сложности, но и за счет изменения технологии и режима печати создавать материалы с уникальным набором свойств. Однако создание изделий путем наложения и спекания отдельных слоев не гарантирует монолитность готовой конструкции, что зачастую при определенных нагрузках приводит к расслоению. По этой причине в первую очередь под сомнение ставятся прочностные свойства напечатанных 3D-моделей. Поскольку свойства «сгенерированного» (за счет используемого исходного пластика, технологии и режима печати) материала возможно оценить только, имея непосредственно готовую продукцию, то на сегодняшний день актуальной является задача поиска и развития методов неразрушающего контроля физико-механических характеристик материалов таких изделий.

В настоящее время одним из наиболее интенсивно развивающихся методов неразрушающего контроля является метод индентирования. Суть метода заключается в определении свойств материала по его реакции на внедрение жесткого индентора [1, 2]. Однако метод индентирования в его классическом представлении – статического нагружения – малоприменим для оперативного контроля в полевых условиях. Для решения таких задач, как правило, используют метод динамического индентирования (МДИ) – ударного нагружения [3].

Современные темпы развития измерительной техники, принцип действия которой основан на регистрации и анализе процесса ударного внедрения индентора в упругопластические неметаллические материалы, требуют разработки прикладных основ теории контактного взаимодействия. В настоящее время большинство работ, посвященных вопросам моделирования процесса упругопластического деформирования, носят исключительно теоретический характер и малоприменимы на практике ввиду большого числа поправочных коэффициентов, незначительно отличающих их от классических моделей упругопластического контакта, рассмотренных такими авторами как Джонсон К., Алехин В.П. и Бульчев С.И. [4, 5]. В тоже время важнейшей прикладной задачей является разработка универсального подхода, позволяющего максимально корректно описать процесс нагружения материала и оценить его физико-механические характеристики по регистрируемым параметрам соответствующей модели. В связи с этим актуален вопрос правомерности использования известных моделей статического нагружения в случае динамического приложения нагрузки.

Основные положения

Характерным отличием динамического нагружения от статического является запаздывание максимального перемещения индентора h_{max} относительно максимального контактного усилия P_{max} (рисунок 1), поэтому диаграмма ударного нагружения не имеет острого пика, свойственного для статического способа нагружения.

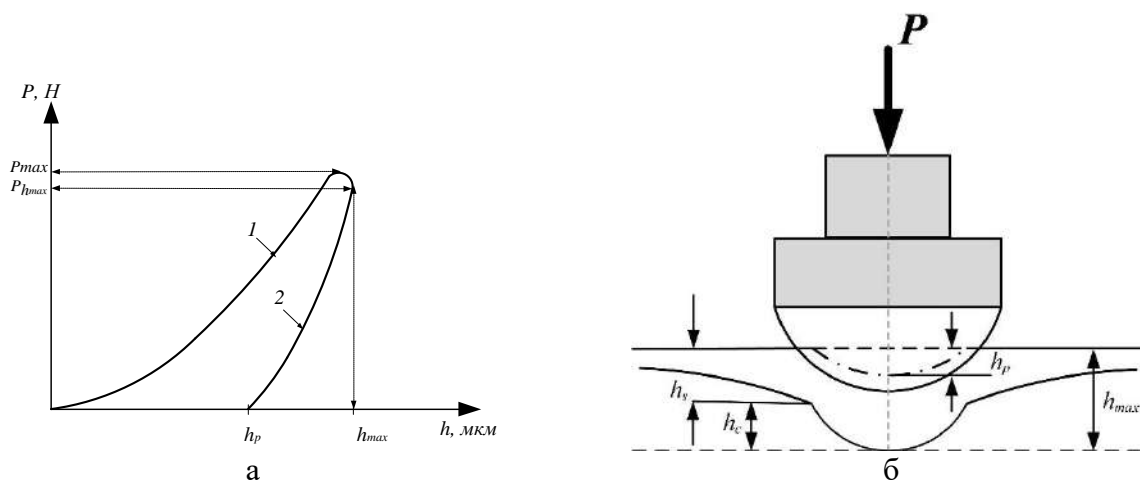


Рисунок 1 – Общий вид диаграммы ударного нагружения упругопластического материала сферой (а) и схематичное представление поперечного сечения отпечатка (б)

1 – кривая нагружения; 2 – кривая разгрузки;

h_{max} – максимальная глубина внедрения; h_s – упругий прогиб контура отпечатка;

h_c – контактная глубина внедрения; h_p – глубина пластического отпечатка

В связи с этим анализ и обработка диаграммы ударного нагружения – зависимости $P(h)$ – представляет более сложную задачу перехода от регистрации ударного процесса индентирования к моделям деформирования исследуемого материала и аналитическому представлению его физико-механических характеристик через параметры динамического взаимодействия: максимальную глубину внедрения, глубину пластического отпечатка, максимальное контактное усилие и другие.

Как правило на практике для контроля свойств материалов методами индентирования используют инденторы сферической, конической и пирамидальной форм. Однако для решения более сложных и специфических задач в ряде случаев прибегают к нестандартным решениям – использованию инденторов неосесимметричной формы. Примером тому может служить оценка твердости и модуля упругости анизотропных слоистых материалов посредством внедрения индентора в виде клина [6]. Для аналитического описания упругопластического контакта жесткого клина (рисунок 2а) предложено использовать подход, в рамках которого зависимость $P(h)$ может быть найдена как произведение площади проекции контактной поверхности и напряжения, возникающего в материале при внедрении в него индентора [7].

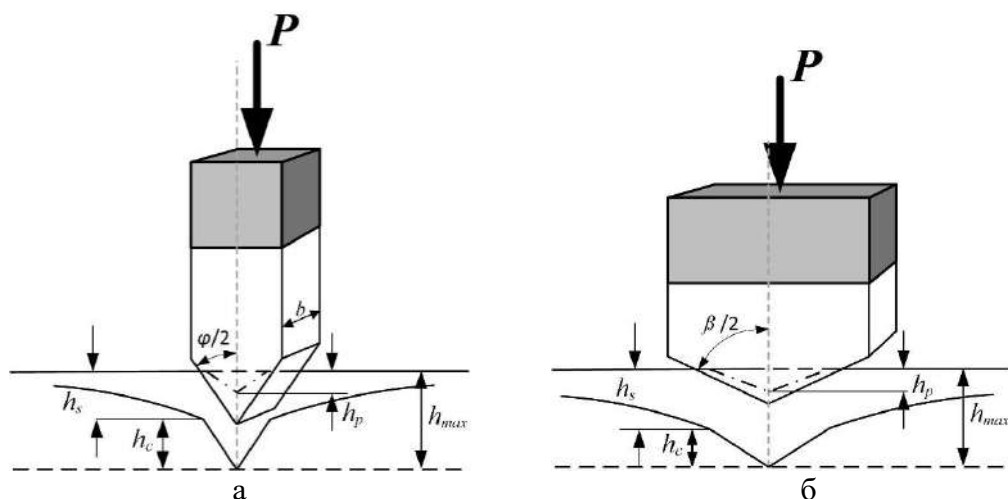


Рисунок 2 – Схематичное представление поперечного сечения отпечатка при деформировании упругопластического материала клиновидным (а) и пирамидальным (б) инденторами

Таким образом общий вид уравнения связи контактного усилия с параметром глубины вдавливания клина имеет вид:

$$P(h) = bE^*(h - h_p), \quad (1)$$

где b – ширина клина, E^* – приведенный модуль упругости системы индентор-материал.

Используя в качестве основной расчетной точки на диаграмме ударного нагружения значение $P_{hmax}(h_{max})$ были получены основные выражения для расчета твердости и модуля упругости упругопластического материала при внедрении в него клина:

$$H = \frac{P_{hmax}}{2b \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} (0,27h_{max} + 0,73h_p)} \quad (2)$$

$$E = \frac{2P_{hmax}(1 - \mu^2)}{b(h_{max} - h_p)} \quad (3)$$

где φ – угол при вершине клина, μ – коэффициент Пуассона контролируемого материала.

Аналогичным образом данный подход может быть использован при рассмотрении контактных задач в случае динамического внедрения инденторов различных форм. Например, при использовании сферического индентора (рисунок 1б) выражения для расчета твердости и модуля упругости имеют вид:

$$H = \frac{P_{hmax}}{\pi R_i (h_{max} + h_p)} \quad (4)$$

$$E = \frac{3P_{hmax}(1 - \mu^2)}{4\sqrt{R_i}(h_{max} - h_p)^{3/2}} \quad (5)$$

а при внедрении пирамидального индентора Виккерса (рисунок 2б):

$$H = \frac{P_{hmax}}{16 \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2} (5h_{max} + 3h_p)^2} \quad (6)$$

$$E = \frac{P_{hmax}(1 - \mu^2)}{2(h_{max} - h_p)^2 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} \quad (7)$$

где β – угол при вершине пирамиды Виккерса между ее противолежащими гранями.

Выводы

Предложенные аналитические модели контактного деформирования послужат основой для разработки уникальных методик измерения твердости и модуля упругости изотропных и анизотропных полимерных композиционных материалов, полученных путем аддитивного синтеза по различным технологиям: FDM (Fused deposition modeling), SLM (Selective laser melting), SLS (Selective laser sintering), SLA (сокращенно от Stereolithography) и т.д. Кроме того при должной численной верификации данных динамического индентирования с результатами стандартных испытаний, разработанные методики контроля могут быть реализованы в сертифицированном измерительном оборудовании, которое позволит оперативно проводить контроль свойств готовой продукции аддитивного синтеза, и установить не только подходящий вид исходного сырья, используемого для 3D-печати, но и подобрать оптимальный режим и способ печати с учетом требуемых прочностных свойств и распределения нагрузки в изделии при эксплуатации.

Благодарность

Работа выполнена в рамках Национальной программы стипендий для молодых ученых при финансовой поддержке Всемирной федерации ученых (World Federation of Scientists National Scholarship Programme).

Список литературы

1. Oliver W.C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / W.C. Oliver, G.M. Pharr // *J. Mater. Res.* – 2004. – Vol. 19, № 1. – P. 3 – 20.
2. Piecewise linear deformation characteristics and a contact model for elastic-plastic indentation considering indenter elasticity / Panpan Weng, Xiaochun Yin, Wei Hu [et al.] // *Tribology International.* – 2021. – Vol. 162, October 2021, P. 107-114.
3. Рудницкий, В.А. Испытание эластомерных материалов методами индентирования / В.А. Рудницкий, А.П. Крень; под. ред. П.П. Прохоренко. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 227 с.
4. Булычев, С.И. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / С.И. Булычев, В.П. Алехин. – М.: Машиностроение, 1190.– 224 с.
5. Johnson, K. L. Surface energy and the contact of elastic solids / K.L. Johnson, K. Kendall, A. D. Roberts // *Proc. R. Soc. Lond. A.* – 1971. – Vol. 324, iss. 1558. – P. 301–313.
6. Крень, А.П. Повышение информативности контроля анизотропных углеродных материалов методом низкоскоростного ударного индентирования / А.П. Крень, Т.А. Протасеня, В.А. Рудницкий // *Материалы. Технологии. Инструменты.* – 2014. – Том 19, № 3. – С. 88-94.
7. Popov, V.L. Kontaktmechanik und Reibung. Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation / V.L. Popov. – Berlin: Springer, 2009. – 328 z.

MODELS OF ELASTOPLASTIC STRAINING OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS OBTAINED BY ADDITIVE SYNTHESIS UNDER IMPACT LOADING BY A RIGID INDENTOR

Pratasenia T.A. – Ph.D (Engineering), e – mail: 5657397@gmail.com

Kren A.P. – D. Sc. (Engineering), Assistant professor, e – mail: 7623300@gmail.com

Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus, 220072, Minsk, Republic of Belarus, Akademicheskaya Str. 16.

Abstract

Models of elastoplastic deformation have been developed, which make it possible to determine the hardness and elastic modulus of both isotropic polymer composite materials and anisotropic ones, taking into account their structural inhomogeneity, based on the parameters of the shock loading diagram of the material by spherical, pyramidal and wedge-shaped inductors. The proposed models of contact interaction are the basis for the development of methods for controlling the physical and mechanical characteristics of materials obtained by 3D printing using various technologies with subsequent implementation in portable measuring equipment.

Keywords: contact interaction models, control, indentation, additive synthesis, hardness, elastic modulus, polymer composites.

УДК 621.763

МЕХАНИЧЕСКОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЯ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

*САПУНОВ Валерий Викторович¹, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: sapunov_vv@mail.ru*

*ВЕТКАСОВ Николай Иванович¹, доктор техн. наук, доцент,
e-mail: nppwt@ulstu.ru*

*ВАРЛАМОВ Сергей Александрович¹, аспирант,
e-mail: serge.varlamov@mail.ru*

¹Ульяновский государственный технический университет, 432027, Российская Федерация, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

Аннотация

Рассмотрена проблема синтеза нанокompозитов на алюминиевых матрицах, армированных углеродными нанотрубками, с высокими физико-механическими характеристиками, в части достижения однородной дисперсии углеродных нанотрубок в алюминиевой матрице композита. В качестве исходных материалов использовали порошок алюминиевый первичный дисперсный марки ПАД-1, одностенные углеродные нанотрубки TUBALL и стеариновую кислоту в качестве агента регулирования процесса. Представлены данные о достигаемых прочностных параметрах полуфабрикатов алюмоматричных композитов.

Ключевые слова: композиционный материал; алюминий; углеродные нанотрубки; механическое легирование; композиционные гранулы.

Введение

В настоящее время многостенные (МУНТ) и одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) находят все большее применение в качестве армирующего материала в металломатричных композитах. Особый интерес вызывают нанокompозиты на основе алюминиевых матриц, широко востребованные в аэрокосмической и автомобильной промышленности [1 – 3].

Анализ результатов опубликованных работ [4 – 5], выполненных в области исследований и создания алюмоматричных композиционных материалов с применением УНТ, показывает, что ключевой проблемой синтеза нанокompозитов на алюминиевых матрицах, армированных УНТ, с высокими физико-механическими характеристиками, является достижение однородной дисперсии УНТ в алюминиевой матрице композита.

По мнению ряда исследователей [6 – 8] эффективная дисперсия УНТ в порошке алюминиевой матрицы при успешной ее реализации в процессе синтеза композиционных гранул из составных порошков, а затем и готовых композитов с применением интенсивной механической деформации, в частности методом механического легирования, является основой достижения высоких физико-механических свойств композитов. Авторы этих работ справедливо утверждают, что кластеризация и агломерация УНТ являются критической технологической проблемой.

При этом, как у упомянутых, так и у других исследователей [9 – 11] весь процесс получения композиционных гранул реализуется в режиме постоянной энергии деформирования.

ния (при одинаковом числе оборотов устройств легирования (атриторов, шаровых и планетарных мельниц). Авторы исследований варьировали размерами фракций матричного порошка [12], концентрацией вводимых УНТ [13], продолжительностью обработки [14], средой [15], агентами регулирования процесса, соотношения масс шихты и шаров [16] и проч.

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований по поиску эффективной технологии синтеза композиционных гранул для алюмоматричных композитов механическим легированием алюминиевого порошка ПАД-1 одностенными углеродными нанотрубками TUBALL (ОУНТ).

Методика исследований

В качестве исходных материалов использовали:

- порошок алюминиевый первичный дисперсный марки ПАД-1 (СТО22436138-006-2006) с использованием фракции размером до 30 мкм;
- одностенные углеродные нанотрубки TUBALL 01RW01 (ТУ 2166-001-91735575-2014) со средним внешним диаметром не более 3 нм и полной удельной поверхностью не менее 300 м²/г.

Также использовали кислоту стеариновую (ГОСТ 6484 – 96), способствующую процессу нормализации шихты, в качестве поверхностно-активного реагента, регулирующего процесс.

Для получения композиционных гранул в качестве базовой использовали шихту следующей рецептуры:

- матричный порошок ПАД-1 – 97,5 % масс.;
- одностенные углеродные нанотрубки TUBALL (ОУНТ) – 2 % масс.;
- стеариновая кислота – 0,5 % масс.

Нормализацию шихты и ее последующее легирование проводили в механическом реакторе оригинальной конструкции, которая включает два внутренних виброэлемента, закрепленных на единой горизонтальной оси, создающих вибросиловые воздействия на шаровые помольные тела в двух взаимно перпендикулярных направлениях с фазовым сдвигом 30° [17, 18].

Морфологию и размер частиц оценивали с помощью цифрового микроскопа Dino-Lite AM4112PT и оптического микроскопа Альтами МЕТ 6Т. Твердость образцов по Роквеллу (шкала HRB) измеряли на твердомере TP150M. Данный метод контроля выбран из тех соображений, что достоверная оценка твердости материала возможна при воздействии индентора на большой объем материала [19].

Холодное и горячее прессование выполняли на прессе ПБ6324Б с усилием до 1000 Н с применением разработанной и изготовленной авторами специальной оснастки и вспомогательного оборудования.

Базовую технологию получения исходной смеси ПАД-1 и ОУНТ, а затем ее последующее механическое легирование реализовывали с применением двухвibratorного механического реактора упомянутой выше авторской конструкции при следующих параметрах:

- число оборотов вибратора при нормализации шихты – 200 об/мин (с применением реверса через каждые 10 мин);
- число оборотов вибратора при механическом легировании – 400 об/мин (с применением реверса через каждые 30 мин). При этом в ходе механического легирования выполнялся периодический поворот (по часовой, а затем против часовой стрелки) рабочей камеры вокруг оси через каждые 15 мин на угол 90°;
- мелющие тела – шары из стали ШХ15 диаметром 10 мм;

- массовое соотношение шаров и шихты – 55:1;

Обработку производили в среде аргона марки «Ч».

Варьировали продолжительностью процесса механического легирования на четырех уровнях: 40, 80, 120 и 160 мин.

В качестве критериев достаточной длительности первого этапа процесса механического легирования были приняты:

- снижение насыпной плотности шихты до $0,3...0,4 \text{ г/см}^3$ при исходной насыпной плотности ПАД-1, равной $1,08...1,1 \text{ г/см}^3$;

- ограничение размера агломератов УНТ, который не должен превышать максимального размера исходного легируемого матричного порошка (30 мкм);

- переход процесса МЛ в установившийся режим, характеризуемый отсутствием изменения насыпной плотности шихты в течение, не менее чем 20 мин.

Продолжительность процесса механического легирования составляла 180 мин. Критерием завершения процесса синтеза являлось достижение насыпной плотности композиционных гранул, не ниже насыпной плотности исходного матричного порошка.

В процессе МЛ и после его завершения регистрировали морфологию частиц, а также оценивали их состояние в части «захвата» агломератов нанотрубок, а после завершения механического легирования регистрировали морфологию и гранулометрический состав полученных композиционных гранул.

В качестве основного показателя эффективности введения в технологию синтеза композиционных материалов, армированных ОУНТ, процесса нормализации шихты приняли уровень прочностных характеристик материала, оцениваемый по достигаемому значению твердости в единицах HRB.

Образцы для измерения твердости получали компактированием композиционных гранул холодным прессованием при $20...25 \text{ }^\circ\text{C}$, либо в брикеты диаметром 21 мм и высотой 7 мм, плотностью $2,45...2,47 \text{ г/см}^3$, либо в брикеты диаметром 39,2 мм и высотой 12,5 мм, с плотностью $2,25...2,3 \text{ г/см}^3$. Брикеты диаметром 39,2 мм подвергали горячему прессованию (горячей подпрессовке) при $520...560 \text{ }^\circ\text{C}$ с получением образцов с плотностью $2,60...2,64 \text{ г/см}^3$.

Результаты

На первом этапе выполнили серию последовательных самостоятельных процессов механического легирования. На различных этапах процесса МЛ анализировали закономерности изменения насыпного веса и морфологии шихты в зависимости от его продолжительности. После механического легирования шихты анализировали закономерности изменения насыпного веса, гранулометрического состава и морфологии композиционных гранул.

Первый этап процесса МЛ сопровождается снижением насыпной плотности шихты до установившегося значения $0,33...0,35 \text{ г/см}^3$, что свидетельствует о правильном определении примененного уровня низкоэнергетического воздействия, при котором исключается процесс холодной сварки, характеризующийся формированием композиционных гранул, сопровождающимся ростом их насыпного веса. Из анализа морфологии частиц, полученных на данном этапе МЛ, следует, что цель операции достигнута – наблюдается захват агломератов ОУНТ расплюснутыми частицами матричного алюминия. Агломераты захватываются как периферией, так и поверхностью деформированных алюминиевых частиц, имеющих многочисленные разрывы и складки. При этом размеры агломератов, с высокой вероятностью состоящих из не подвергшихся разрушению исходных ОУНТ, не превышают исходный размер матричного ПАД-1 (до 30 мкм).

Таким образом, можно предположить, что на первом этапе процесса МЛ действительно достигается однородное объемное бездефектное распределение ОУНТ в массиве шихты.

На втором этапе механического легирования формируются объемные композиционные гранулы: происходит их увеличение и уплотнение с одновременным увеличением насыпной плотности. Насыпной вес возрастает от установившегося минимального, достигнутого в результате нормализации шихты, до установившегося значения, близкого к насыпному весу исходного матричного порошка ПАД-1. В выполненной серии экспериментов продолжительность механического легирования ограничивалась временем в течение которого достигалось увеличение насыпного веса до $1,08...1,12 \text{ г/см}^3$.

При анализе морфологии композиционных гранул, полученных после механического легирования, в части трансформации состояния сформированных в результате нормализации шихты агломератов ОУНТ, выявлено их исчезновение, что наиболее вероятно связано с поглощением их содержимого массивом гранул. Это подтверждается окрашиванием (изменением цвета) поверхности наблюдаемых гранул в выраженный темно-серый цвет, контрастирующий с серебристым цветом чистого матричного алюминиевого порошка, подвергнутого нормализации шихты и механическому легированию на тех же режимах. Окрашивание указывает на присутствие ОУНТ непосредственно в поверхностном слое композиционных гранул, образованном поверхностями входящих в их состав более мелких гранул. Причем следует полагать, что это касается и внутренних поверхностей раздела между мелкими гранулами, из которых в процессе механического легирования в результате холодной сварки формируются наблюдаемые композиционные гранулы, что, в свою очередь, определяет высокую однородность распределения ОУНТ в массивах как композиционных гранул, так и готового композиционного материала. Возможное окрашивание поверхности композиционных гранул углеродом, который мог образоваться в результате аморфотизации нанотрубок проверено по методике [20].

Результаты экспериментальных исследований и контроля гранулометрического состава композиционных гранул, твердости компактированных образцов плотностью $2,45 \text{ г/см}^3$, полученных холодным прессованием, твердости компактированных образцов плотностью до $2,64 \text{ г/см}^3$, полученных горячим прессованием, по методу Роквелла по шкале HRB представлены в таблице 1.

На основании данных таблицы 1, принимая за базу для сравнения параметры первого опыта, представляющего собой контрольный образец из чистого матричного порошка, обработанный в режиме механического легирования в тех же режимах, в которых обрабатывалась шихта с добавлением УНТ, можно констатировать следующее.

Введение 1,5 % ОУНТ дает измельчение фракционного состава и обеспечивает некоторое упрочнение (твердость образцов выше твердости контрольных образцов, деформационно упрочненных в результате механического легирования, в единицах HRB на 15...20 %).

После горячего прессования достигается твердость образцов превышающая твердость контрольных деформационно упрочненных образцов не менее чем на 100 %.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований

№ п/п	Рецептура шихты	Характеристика процесса	Гранулометрический состав, % масс.				Твердость HRB
			0... 63 мкм	63... 140 мкм	140... 700 мкм	>700 мкм	
1	99,5 % ПАД-1 0,5 % СК	МЛ + ХП	–	23,3	75,5	1,2	< 40
2	97,5 % ПАД -1 1,5 % ОУНТ 0,5 % СК	МЛ + ХП	15,9	39,5	36,8	7,8	56...59
3	97,5 % ПАД -1 1,5 % ОУНТ 0,5 % СК	МЛ + ХП + ГП при 530°С до плотности 2,6 г/см ³	–	–	–	–	68...70
4	97,5 % ПАД -1 1,5 % ОУНТ 0,5 % СК	МЛ + ХП + ГП при 550°С до плотности 2,65 г/см ³	–	–	–	–	77... 80

Примечание: МЛ – механическое легирование, ХП – холодное прессование, ГП – горячее прессование, СК – стеариновая кислота.

Выводы

1. Разработана технология механического легирования, позволяющая решать задачу обеспечения однородного распределения УНТ в массиве композиционного материала на первой стадии подготовки шихты к механическому легированию. Сформулированы основные требования к операции механического легирования и режиму ее реализации.

2. Результаты работы могут быть использованы как основа для совершенствования технологий получения алюмоматричных композитов с высокими физико-механическими характеристиками.

Список литературы

1. Anantha Prasad M.G., Bandekar N. Study of Microstructure and Mechanical Behavior of Aluminum/Garnet/Carbon Hybrid Metal Matrix Composites (HMMCs) Fabricated by Chill Casting Method // Journal of Materials Science and Chemical Engineering. 2015. Vol. 03. № 03. P. 3–11.

2. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Наука–Физматлит, 2007. 416 с.

3. Ostovan F., Matori K.A., Toozandehjani M., Oskoueian A., Yusoff H.M., Yunus R., Ariff A.M., Quah H.J., Lim W.F. Effects of CNTs content and milling time on mechanical behavior of MWCNT-reinforced aluminum nanocomposites. Materials Chemistry and Physics, 2015, vol. 166, P. 160–166.

4. Веткасов Н.И., Капустин А.И., Сапунов В.В. Получение, микроструктура и микротвердость легированных углеродом алюмоматричных композитов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 6 (67). С. 23-31.

5. Raviathul V.M., Srivastava V.C., Mukhopadhyay N.K. Microstructural characteristics and mechanical properties of carbon nanotube reinforced aluminum alloy composites produced by ball milling // Materials & Design. 2014. Vol. 64. P. 542–549.

6. Ci L., Ryu Z., Jin P.N.Y., Rühle M. Investigation of the interfacial reaction between multi-walled carbon nanotubes and aluminum // *Acta. Mater.* 2006. Vol. 54. P. 5367–5375.
7. Choi H., Shin J., Min B., Park J., Bae D. Reinforcing effects of carbon nanotubes in structural aluminum matrix nanocomposites // *Journal of Materials Research.* 2011. Vol. 24. P. 2610–2616.
8. Vetkasov N., Kapustin A., Sapunov V. Study of the process of mechanical doping of aluminum with nanoscale allotropic carbon modifications // *Materials Today: Proceedings. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2019.* 2019. P. 2299-2303.
9. Hassan M.T.Z., Esawi A.M.K., Metwalli S. Effect of carbon nanotube damage on the mechanical properties of aluminum-carbon nanotube composites // *Journal of Alloys and Compounds.* 2014. Vol. 607. P. 215–222.
10. Yoo S.J., Han S.H., Kim W.J. Strength and strain hardening of aluminum matrix composites with randomly dispersed nanometer-length fragmented carbon nanotubes // *Scr. Mater.* 2013. Vol. 68. P. 711–714.
11. Wang L., Choi H., Myoung J.M., Lee W. Mechanical alloying of multi-walled carbon nanotubes and aluminium powders for the preparation of carbon/metal composites // *Carbon.* 2009. Vol. 47. P. 3427–3433.
12. Zhu X., Zhao Y.G., Wu M., Wang H.Y., Jiang Q.C. Effect of Initial Aluminum Alloy Particle Size on the Damage of Carbon Nanotubes during Ball Milling // *Materials.* 2016. Vol. 9. № 3. P. 3–18.
13. Nayan N., Murty S.V.S.N., Sharma S.C., Kumar K.S., Sinha P.P. Calorimetric study on mechanically milled aluminum and multiwall carbon nanotube composites // *Materials Characterization.* 2011. Vol. 62. P. 1087–1093.
14. Kukovecz A., Kanyo T., Konya Z., Kiricsi I. Long-time low-impact ballmilling of multi-wall carbon nanotubes. *Carbon* 2005, 43, P. 994 – 1000.
15. Nam H.R., Kim Y.J., Yang S.S., Ahn J.H. Ball-Milling of Graphite and Multi-Wall Carbon Nanotubes // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology.* 2014. Vol. 14. P. 9103–9107.
16. Narayanan S.S., Manickavasaham G., Moorthy S. Experimental Investigation of Aluminium alloy with MWCNT Composite to increase the technical Properties by Stir Casting Method // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering.* 2015. Vol. 12. Ver. II. P. 30–34.
17. Веткасов Н.И., Капустин А.И., Сапунов В.В. Формирование фазового состава, структурных параметров и физико-механических свойств композиционных гранул в процессе механического легирования алюминия аллотропными формами углерода // *Известия Волгоградского государственного технического университета.* 2017. № 12 (207). С. 7–11.
18. Веткасов Н.И., Капустин А.И., Сапунов В.В. Исследование процесса механического легирования алюминия наноразмерными аллотропными модификациями углерода // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета.* 2017. № 3 (41). С. 24–34.
19. Лопатина Ю.А., Курганова Ю.А. Анализ измерения твердости композиционных материалов системы Al+SiC // III международная научная школа для молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов»: сборник научных трудов. Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 76–80.
20. Веткасов Н.И., Капустин А.И., Сапунов В.В. Разработка и применение процесса предварительного формирования высокооднородной сухой смеси "алюминиевый порошок - одностенные УНТ" в технологии получения алюмоматричных композитов // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета.* 2018. № 3 (45). С. 14-21.

MECHANICAL ALLOYING OF ALUMINUM WITH CARBON NANOTUBES

Sapunov V. V., Ph.D. (Engineering), docent, e – mail: sapunov_vv@mail.ru

Vetkasov N.I., D.Sc. (Engineering), docent, e – mail: nppwt@ulstu.ru

Varlamov S.A., graduate student, e – mail: serge.varlamov@mail.ru

Ulyanovsk State Technical University, 432027, Russian Federation, Ulyanovsk, st. Northern Crown, 32

Abstract

The problem of the synthesis of nanocomposites on aluminum matrices reinforced with carbon nanotubes with high physical and mechanical characteristics is considered in terms of achieving a homogeneous dispersion of carbon nanotubes in the aluminum matrix of the composite. As starting materials, we used PAD-1 primary dispersed aluminum powder, TUBALL single-wall carbon nanotubes, and stearic acid as a process control agent. Data on the achieved strength parameters of semi-finished products of aluminum-matrix composites are presented.

Keywords: composite material; aluminum; carbon nanotubes; mechanical alloying; composite granules.

УДК 621.762:669.2

ВЛИЯНИЕ НИКЕЛЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА Ni_3Al , ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО СПЕКАНИЯ

¹ШЕВЦОВА Лилия Ивановна, кандидат техн. наук,
e-mail: edeliya2010@mail.ru

¹НЕМОЛОЧНОВ Данил Андреевич, студент,
e-mail: drakon13chik@mail.ru

¹Новосибирский государственный технический университет, 630073, Российская Федерация
г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Аннотация

Проведено исследование структуры и оценка механических свойств материала на основе интерметаллида Ni_3Al с добавлением никеля от 10 до 70 мас.%, полученного с использованием технологии электроискрового спекания порошков. Показано, что в структуре спекленного материала никель заполняет промежутки между хрупкими частицами алюминиды никеля и действует как связующее, что приводит к улучшенному сопряжению частиц, и соответственно повышению относительной плотности компактов (более 90%). Рентгенофазовым анализом выявлено формирование твердого раствора на основе Ni_3Al при добавлении никеля. Влияние добавок никеля на свойства спеченных сплавов было установлено по результатам определения твердости по методу Виккерса и испытания на трехточечный изгиб. Введение никеля приводит к снижению твердости до 1500 МПа (при добавлении 70 мас.% никеля). Наиболее высокий уровень прочности при изгибе обнаружено в композите, спеченном из смеси, содержащей 30 мас.% никеля. Прочность этого композита (1900 МПа) вдвое выше, чем у материала, в который не добавлялся никель.

Ключевые слова: интерметаллид Ni_3Al , никель, электроискровое спекание, структура, прочностные свойства.

Введение

Благодаря высокому комплексу механических свойств алюминиды никеля в работах многих специалистов рассматриваются в качестве перспективных материалов конструкционного назначения [1-3]. Наиболее рациональным считается применение алюминидов никеля для изготовления конструкций, работающих при повышенных температурах. Алюминиду никеля Ni_3Al свойственны аномальное увеличение предела текучести при повышении температуры, высокая стойкость к различным типам коррозии, а также стойкость к изнашиванию. В тоже время у поликристаллического соединения Ni_3Al отсутствует пластичность при комнатной температуре и для него характерно низкое сопротивление ползучести при повышенной температуре. Все это препятствует широкому практическому применению данного интерметаллида в качестве самостоятельного материала [4, 5]. Ранее было установлено, что эффективным технологическим процессом, позволяющим получать качественные заготовки из порошковых интерметаллидов, является электроискровое спекание (SPS) [6-9]. Благодаря таким особенностям данного процесса, как: кратковременное высокотемпературное воздействие на смесь порошков за счет прохождения электрического тока через порошковую смесь, оптимальному соотношению режимов нагрева и деформации материала SPS-технология спо-

способствует формированию высокопрочных изделий с высокой относительной плотностью и низким значением остаточных механических напряжений. Однако значительно повысить пластичность интерметаллических материалов с применением рассматриваемой технологии не удастся. Одно из решений отмеченной проблемы заключается в добавлении в порошок хрупкого интерметаллида Ni_3Al частиц пластичного материала. Цель данного исследования заключалась в применении технологии SPS для получения материалов типа «алюминид никеля - никель», а также в изучении их структуры и механических свойств.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных материалов были выбраны промышленный порошок марки ПН85Ю15 (основное соединение Ni_3Al , средний размер частиц составляет 80 мкм) и порошок карбонильного никеля (99,85%, 5 мкм). Порошковые смеси получали в результате перемешивания исходных компонентов в планетарной шаровой мельнице Fritch Pulverisette 6. Содержание никеля в смеси варьировалось от 10 до 70 мас.%. Перемешивание осуществляли стальными шарами в стальном стакане в жидкой среде на основе изопропилового спирта в течение 6 часов. Опорный диск мельницы вращался с частотой равной 100 об/мин.

Для спекания порошков использовали установку SPS Labox-1575. Были использованы следующие параметры спекания: скорость нагрева, давление, температура и время выдержки, значения которых составили 100 °С/мин, 40 МПа, 1100 °С и 5 мин. соответственно. Обоснование выбора режимов спекания отражено в работе [6]. Плотность спеченных образцов определялась гидростатическим взвешиванием. Металлографические исследования спеченных материалов проводили в режиме светлого поля с использованием светового микроскопа Carl Zeiss Axio Observer Z1m. Для определения фазового состава полученных компактов использовали рентгеновский дифрактометр ARL X'TRA. Фрактографические исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP.

Измерение твердости проводили на твердомере Wolpert Group 402MVD. Нагрузку на алмазный индентор использовали равную 9,8 Н. Для определения среднего значения твердости на образцы было нанесено по 10 отпечатков. Прочностные свойства были оценены в результате испытаний на трехточечный изгиб. Из спеченных компактов на установке Sodick AG400L вырезали образцы прямоугольной формы размером 3×4×30 мм³. Испытание на трехточечный изгиб проводили с использованием испытательной машины Instron 3369 и скорости перемещения траверсы равной 0,5 мм/мин.

Результаты и обсуждение

Анализируя снимки, полученные с использованием оптической микроскопии, было выявлено, что в компакте из порошка ПН85Ю15 с добавлением никеля, частицы алюминида никеля сохраняют форму близкую к сферической, при этом пластичный никель действует как связующее и заполняет зазоры между частицами интерметаллида (рисунок 1). При увеличении объемной доли никеля до 70 мас.% расстояние между частицами интерметаллида также увеличивается (рисунок 1б). Следует отметить, что относительная плотность материалов с различным соотношением компонентов, полученных SPS-методом, составляет больше 90%.

Рентгенограммы образцов, полученных перемешиванием в шаровой мельнице порошков интерметаллида Ni_3Al и никеля, при увеличении количества никеля, отличаются друг от друга постепенным раздвоением пиков, соответствующих фазе Ni_3Al (рисунок 2). Предполагается, что раздвоенные пики свидетельствуют о появлении в структуре твердого раствора на основе интерметаллида Ni_3Al (γ' -фаза). При увеличении содержания никеля в композите,

объёмная доля твердого раствора на основе интерметаллида возрастает. При содержании никеля 70 масс.% наблюдается двухфазная структура (γ' -фаза+Ni).

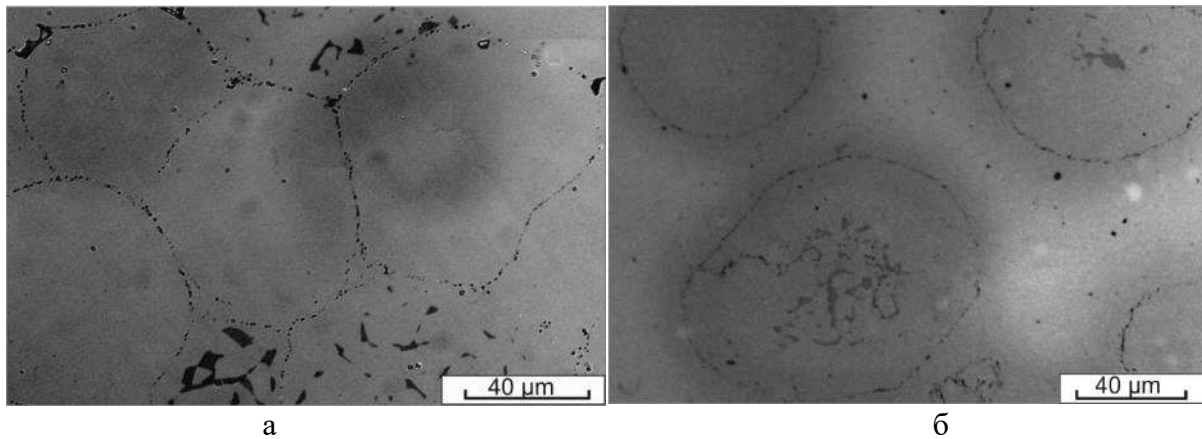


Рисунок 1 – Структура материала, полученного спеканием (SPS) порошка ПН85Ю15 (а), и композита ($\text{Ni}_3\text{Al} + \text{Ni}$), полученного смешиванием порошков ПН85Ю15 и никеля в соотношении 3:7 (б). Оптическая микроскопия

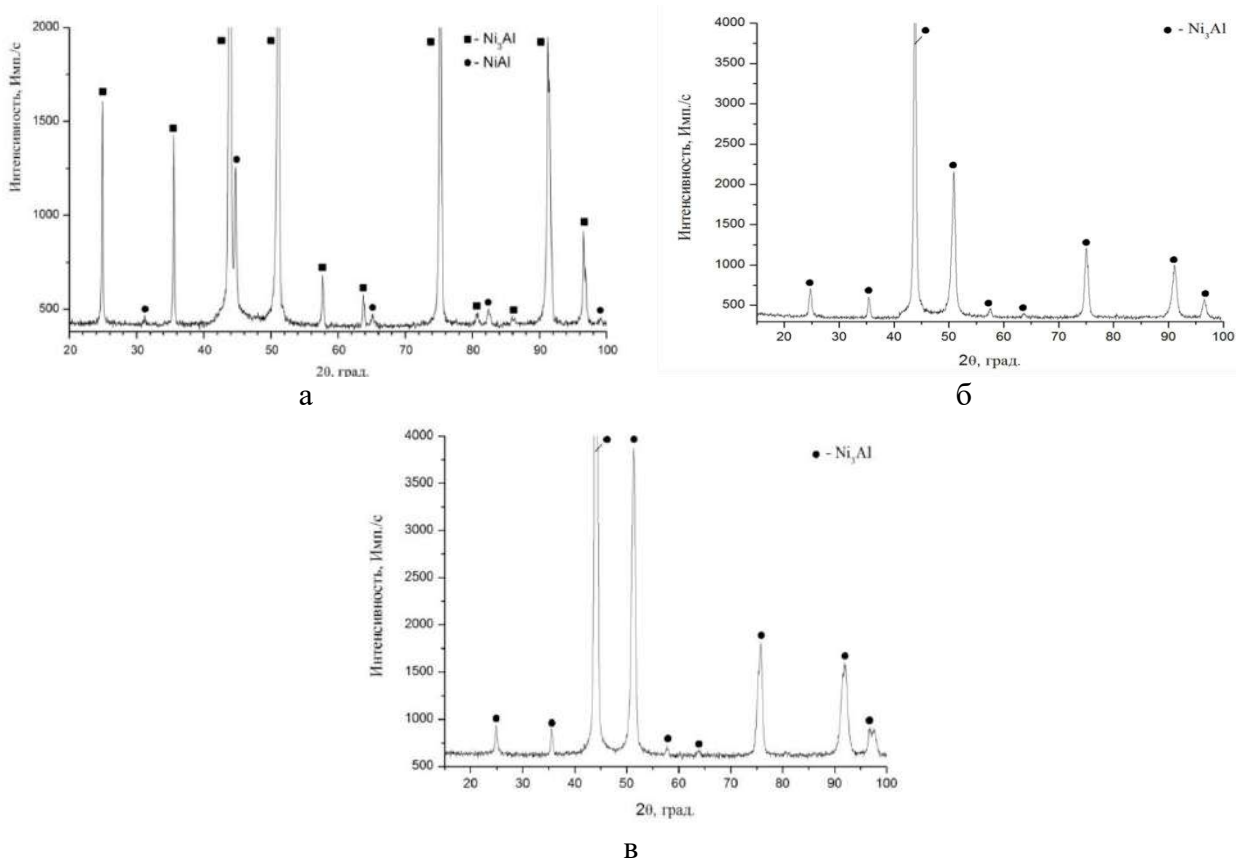


Рисунок 2 – Рентгенограммы спеченных материалов, полученных из порошка Ni_3Al (а) и смешиванием порошков интерметаллида Ni_3Al и никеля в соотношении 9:1 (б) и 3:7 (в)

Твердость спеченного порошка на основе интерметаллида Ni_3Al составляет 3100 МПа, что соответствует значению твердости данного интерметаллида, полученного другим способом [10]. При введении 10-30 мас.% никеля твердость композитов снижается до 2500-2700 МПа, что связано с введением более мягкого компонента в материал.

Анализ результатов прочностных испытаний свидетельствует о том, что с увеличением вводимого никеля до 30 мас.% предел прочности при изгибе увеличивается в два раза по сравнению со спеченным интерметаллидом, не содержащим частицы никеля, и составляет 1900 МПа. При дальнейшем увеличении содержания никеля, значение предела прочности при изгибе уменьшается. Высокая прочность композита, содержащего 30 мас.% никеля можно объяснить его микроструктурой. Действительно, для данного материала характерен смешанный тип разрушения. Пластичная составляющая разрушения образуется за счет наличия в композите микрообъемов никеля. Хрупкий компонент обусловлен разрушением интерметаллидных областей.

Выводы

На основании полученных результатов проведенных исследований было установлено, что:

1. Добавление никеля в порошковую смесь, содержащую хрупкий интерметаллид Ni_3Al , благоприятно влияет на пластичность спеченных материалов. Никель заполняет промежутки между хрупкими частицами алюминид никеля и действует как связующее, что приводит к улучшенному сопряжению частиц, и высокому значению относительной плотности спеченных материалов.

2. Рентгенофазовый анализ свидетельствует о формировании в спеченном порошке марки ПН85Ю15 двух фаз: основной является фаза Ni_3Al , около 5% - фаза $NiAl$. При добавлении никеля свыше 10 мас.% выявлено формирование твердого раствора на основе интерметаллида Ni_3Al .

3. Композит, полученный смешиванием промышленного порошка марки ПН85Ю15 (основная фаза Ni_3Al) и никеля в соотношении 7:3 и последующим спеканием (SPS) при 1100 °С, является перспективным материалом, обладающим высокими показателями прочностных свойств. Предел прочности при изгибе такого материала составляет 1900 МПа, что в два раза превосходит значение прочности алюминид никеля без добавления никеля.

Список литературы

1. Deevi, S. C., Sikka, V. K. Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications // *Intermetallics*. – 1996. – № 4. – P. 357–375.
2. Гринберг, Б. А., Иванов, М. А. Интерметаллиды Ni_3Al и $TiAl$: микро-структура, деформационное поведение. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 360 с.
3. Taub, A. I., Fleischer, R. L. Intermetallic Compounds for High-Temperature Structural Use // *Science*. – 1989. – Vol. 243. – № 4891. – P. 616 - 621.
4. Каблов, Е. Н., Оспенникова, О. Г., Базылева, О. А. Материалы для высоко теплонегруженных деталей газотурбинных двигателей // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. «Машиностроение». Металлургия*. – 2011. – № SP2. – С. 13-19.
5. Hyjek, P. Ductilization of Ni_3Al by alloying with boron and zirconium / P. Hyjek, I. Sulima, S. Wierzbinski // *Archives of Materials Science and Engineering*. – 2009. – Vol. 40. – № 2. – P. 69-74.

6. Groza, J. R., Zavaliangos, A. Nanostructures bulk solids by field activated sintering // *Rev. Adv. Mater. Sci.* – 2003. – Vol. 5. – №1. – P. 24-33.
7. Sivakumar, R.. Mullite-molybdenum composites fabricated by pulse electric current sintering technique / R. Sivakumar, D. Doni Jayaseelan, T. Nishikawa, S. Honda, H Awaji // *J. European Ceramic society.* – 2002. – Vol. 22. – P. 761-768.
8. Shevtsova, L. I. Ni₃Al+B material obtained by mechanical activation followed by spark plasma sintering / L. I. Shevtsova, M. A. Korchagin, M. A. Esikov, E. A. Lozhkina, V. S. Lozhkin, V. V. Samoilenko, D. A. Nemolochnov, V. N. Malikov // *Mater. Today: Proceed.* - 2019. - Vol. 12. - P. 120–123.
9. Frage, N. High temperature dynamic response of SPS-processed Ni₃Al / N. Frage, S. Kalabukhov, A. Wagner, E. B. Zaretsky, // *Intermetallics* - 2018. - Vol. 02 - P. 26–33.
10. Shee, S.K. Effect of alloying on the microstructure and mechanical properties of Ni₃Al / S.K. Shee, S.K. Pradhan, M. De // *J. Alloy. Compd.* - 1998. - Vol. 265 - No. 1-2. P. 249–256.

INFLUENCE OF NICKEL ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF Ni₃Al OBTAINED BY SPARK PLASMA SINTERING

Shevtsova L.I., PhD (Engineering), e – mail: edeliya2010@mail.ru
Nemolochnov D.A., student, e – mail: drakon13chik@mail.ru

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

Abstract

The structure and mechanical properties of the Ni₃Al intermetallic compound with the addition of nickel from 10 to 70 wt.%, obtained by spark plasma sintering, have been studied. It is shown that in the structure of the sintered material, nickel fills the gaps between the brittle particles of nickel aluminide and acts as a binder, which leads to improved conjugation of particles and, accordingly, an increase in the relative density of the sintered materials (more than 90%). X-ray phase analysis revealed the formation of a solid solution based on the Ni₃Al intermetallic compound with the addition of nickel. The effect of the nickel additions on the properties of the sintered alloys was established from the results of determining the hardness by the Vickers method and the three-point bending test. The introduction of nickel leads to a decrease in hardness to 1500 MPa (with the addition of 70 wt.% nickel). The highest value of ultimate bending strength was found in a composite sintered from a mixture containing 30 wt.% nickel. The bending strength of this composite (1900 MPa) was twice as high as that of the material, to which nickel was not added.

Keywords: Ni₃Al intermetallic compound, nickel, spark plasma sintering, structure, strength properties.

УДК 621.52: 669.1

АНАЛИЗ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

*ШОЛОНИК В.Е.*¹

*ГОРИЧЕНКО С.Ф.*¹

*АНИСОВИЧ А.Г.*², д-р физ.-мат. наук, проф.

*ГАРКУН А.С.*³, канд. физ.-мат. наук

*КРЕНЬ А.П.*³, д-р техн. наук, проф.

*АСАДЧАЯ М.В.*³, канд. техн. наук

*БАЕВ. А.Р.*³, д-р техн. наук, проф.

¹ПРУП «Мингаз» Минэнерго Республики Беларусь, Минск РБ

²Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск РБ

³Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск РБ

Аннотация

Анализ локальных повреждений труб газораспределительной системы по предложенной методологии исследования раскрыл комплексы основных как технологических, так и эксплуатационных причин образования повреждений на участках системы. Проведенные исследования труб выявили, как производственные дефекты, не связанные с длительной эксплуатацией газопровода, так и почвенную коррозию труб, относящуюся к электротехнической, и обусловленную совместным действием двух факторов: составом грунтов в месте залегания труб и наличием механических повреждений.

Ключевые слова: дефекты газопровода, эксплуатация газораспределительных систем, приборы и методы исследования газопровода.

Введение

Для анализа возможных причин разрушения элементов газораспределительной системы обычно проводится следующий комплекс обширных исследований: визуально-оптический контроль и изучение изломов, дефектоскопический контроль (чаще всего ультразвуковая дефектоскопия), измерение твёрдости и микротвёрдости, металлографические исследования, механические испытания на растяжение и ударную вязкость, определение химического состава материала [1, 2].

Мировой опыт систематизации многочисленных аварийных ситуаций за длительный период эксплуатации газораспределительных систем показал их важнейшие причины [2 - 4]: коррозия, неоднородное напряженно-деформированное состояние материала, а также результат их совместного действия – коррозионное растрескивание под напряжением, усугубляемые упруго-пластическими изгибами. Для анализа конструктивных элементов газораспределительных систем предлагаются новые дополнительные приборы и методы исследования [4 - 6]. По предложенной методологии для сравнительного анализа рассматривались трубы с внутренними расслоениями материала, а также трубы со следами коррозии в местах механических повреждений.

Анализ продольных и поперечных скоростей звука, упругих модулей образца и измерение толщин стенок трубы

Использовался электромагнитоакустический толщиномер и изучались в режиме эхо области с расслоением материала и с участком коррозии. Максимальная толщина соответствует цельному металлу, а меньшая – расслоившемуся.

Визуальный внешний осмотр фрагмента второй трубы обнаружил элементы коррозии с внешней стороны. Возле участка, подвергнутого коррозии, присутствует участок с механическим повреждением.

Данные по измерению упругих модулей образцов металла с использованием данных скорости поперечной и продольной волны по первой и второй трубе представлены в таблице:

	Длина образца, мм	Скорость продольной волны, м/с	Скорость поперечной волны, м/с	Коэффициент Пуассона	Модуль Юнга, ГПа
1	48,6	5884,00	3458,00	0,236	232,34
2	50,3	5867,00	3453,00	0,23	231,75

На основании ультразвукового обследования изученных образцов и измерения скорости продольных и поперечных волн получены данные о модуле Юнга и коэффициенте Пуассона, являющиеся важными характеристиками физико-механических свойств металла.

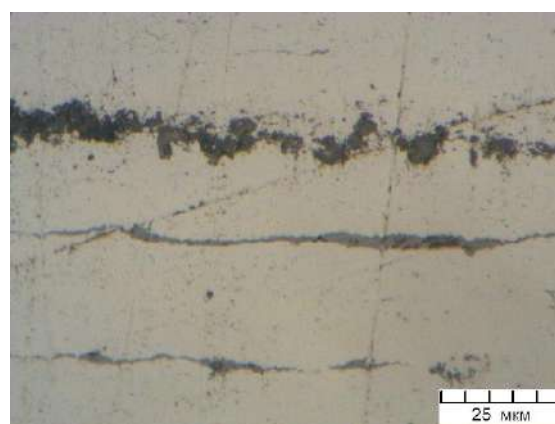
Ультразвуковое обследование с использованием бесконтактного (ЭМА-методом) прозвучивания образцов показало принципиальную возможность определения расслоений в газовых трубах. Однако для практического использования проведения ультразвуковой диагностики последних необходимо проведение дополнительных работ по усовершенствованию конструкции имеющегося устройства (ЭМА-толщиномера) и, соответственно, методики измерений, учитывающей влияние кривизны труб на измерительный тракт.

Анализ структуры образца на участке трубы с внутренними отслоениями

Химический состав фрагмента трубы соответствует Стали 20. На шлифе без травления обнаружены протяженные сульфиды, а также строчки дефектов, предположительно шлаков или продуктов коррозии (рис.1). Балл по сульфидам – порядка 3...4.



а



б

Рисунок 1 – Сульфиды (а) и посторонние включения (б) в стали

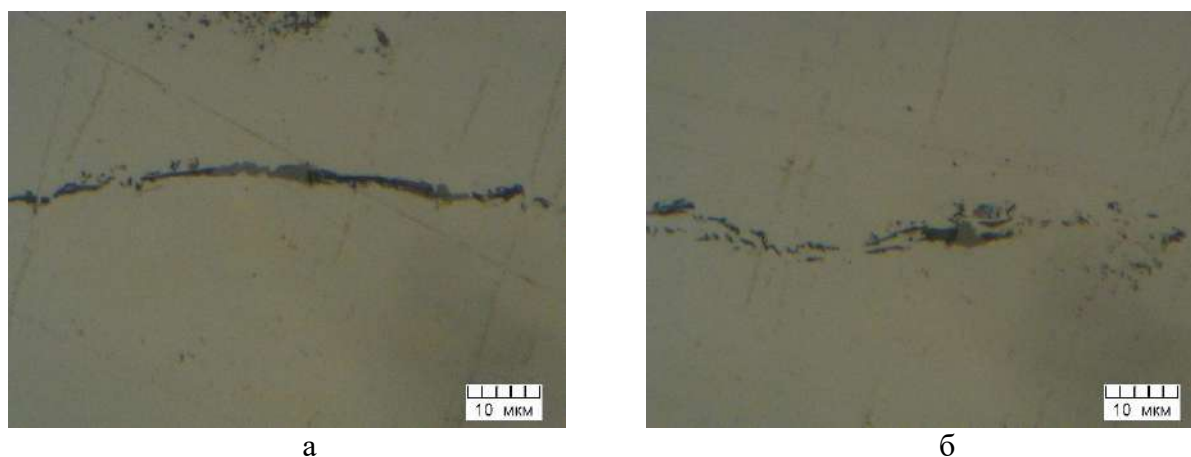
Структура стали - феррит и перлит. Размер зерна феррита – до 30 мкм. Пластинки перлита не разрешаются при 1000^x.

Структура стали видманштетт, балл 2А по ГОСТ 5640-68. В середине образца присутствует зона ярко выраженной структурной неоднородности, представляющая собой полосу феррита с протяженными сульфидами, а также полосу посторонних включений.

На поверхности формируются трещины, которые развиваются, по-видимому, по включениям сульфидов в результате коррозии вдоль сульфидной цепочки.

Анализ структуры образца на исследуемом участке трубы со следами коррозии

Химический состав участка трубы соответствует Стали 10. На нетравленном шлифе при 1500^x обнаружены протяженные включения сульфидов, вытянутые вдоль направления деформации (рис. 2 а). Балл по сульфидам соответствует 4 по ГОСТ 1778-70. Помимо светлых сульфидов в строчке присутствуют темные фрагменты, которые можно классифицировать как шлаки (рис. 2 б).



а б
Рисунок 2 – Морфология сульфидных включений

Структура стали – феррит и перлит. Размер зерна феррита 10...40 мкм. Перлит пластинчатый, грубодисперсный. В некоторых участках структура может быть классифицирована как феррито-карбидная смесь. В поверхностной зоне образцов наблюдаются различные незначительные дефекты в виде трещин.

Физико-механические характеристики и результаты испытаний на ударную вязкость и растяжение

Твердость образцов из Стали 20 по Бринеллю составила 135 НВ. Измерения на ударную вязкость показали значения в диапазоне от 6844 до 7063 Дж/см². Результаты испытаний на разрыв для образцов на участке трубы без видимых дефектов и на участке трубы с внутренними отслоениями представлены на рис. 3.

Твердость образцов из Стали 10 по Бринеллю - 135 НВ. Ударная вязкость в диапазоне от 6625 до 6475 Дж/см².

Испытания на разрыв для образцов на участке трубы без видимых дефектов коррозии представлены на рис. 4.

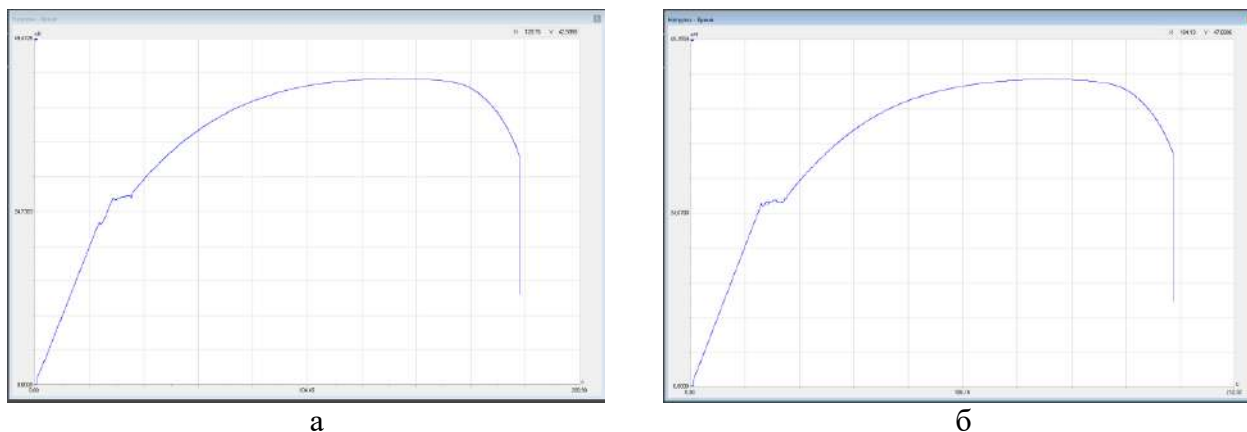


Рисунок 3 – Результаты испытаний на разрыв образца на участке трубы без видимых дефектов (а) и на участке трубы с внутренними отслоениями (б)

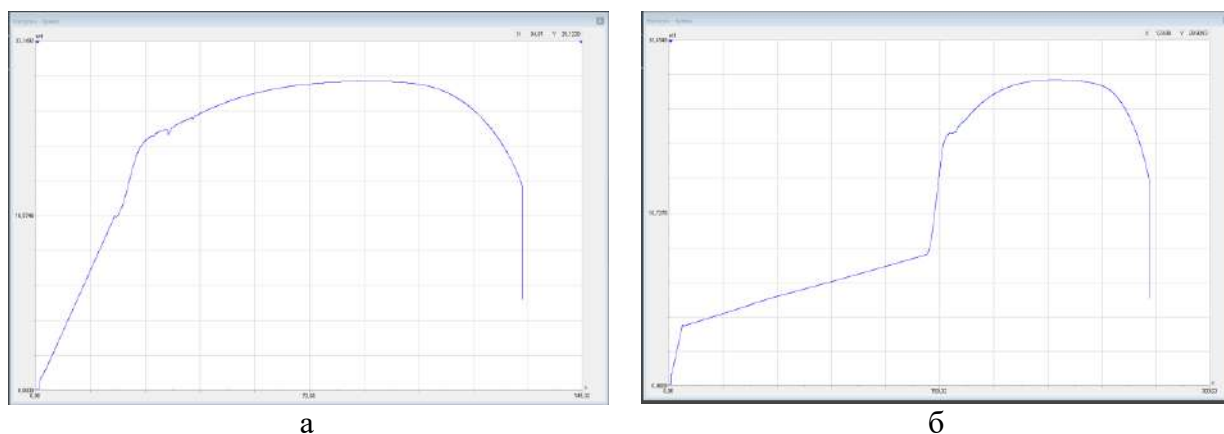


Рисунок 4 – Результаты испытаний на разрыв образца на участке трубы без видимых дефектов коррозии (а) и на участке трубы с дефектами коррозии (б)

Напряженно-деформированное состояние на участке трубы с внутренними отслоениями

Измерения напряжений, возле дефекта, проводились перпендикулярно плоскости плены. Результаты измерений напряжений, показаны на рис. 5.

Как видно из представленной на рис. 5 а поверхности, описывающей изменение напряжений, они во всех случаях не превышают 60 % от предела текучести.

Для оценки опасности изменения напряжений в области плены в зазор искусственно вставлялся клин, который раздвигал края металла. Очевидно, что при этом происходило изменение напряженного состояния (рис. 5 б). Как видно из рисунка, уровень напряжений значительно возрос и превысил значения предела текучести.

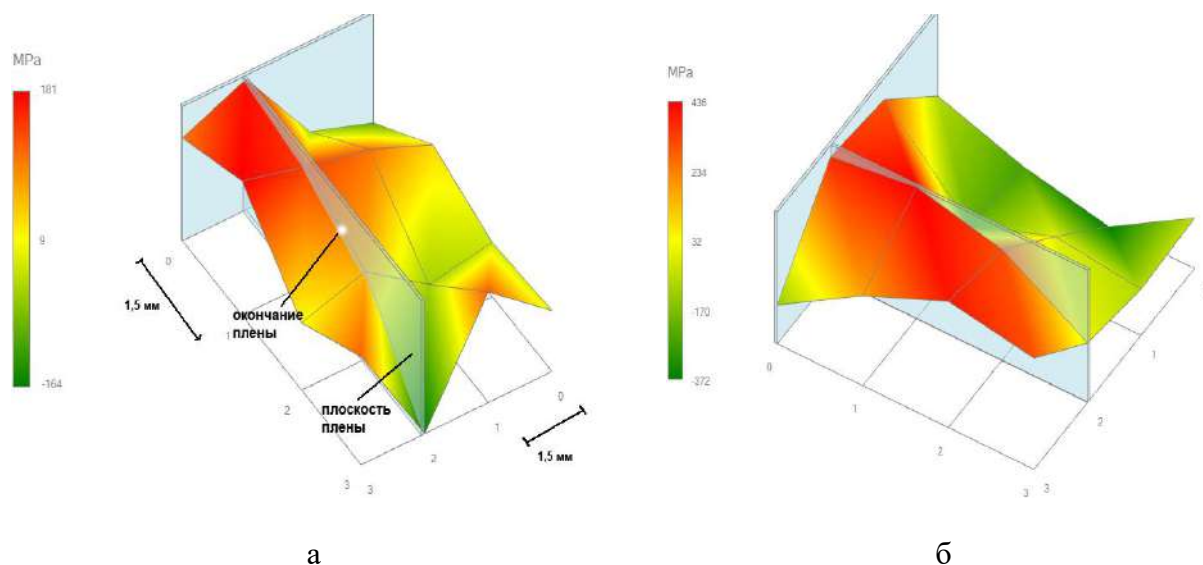


Рисунок 5 – Характер распределения напряжений в области плены:
а – в свободном состоянии, б – после вставки клина в зазор

Выводы

Таким образом, анализ локальных повреждений труб газораспределительной системы по предложенной методологии исследования раскрыл комплексы основных как технологических, так и эксплуатационных причин образования повреждений на участках системы.

Проведенные исследования первой трубы показывают, что обнаруженный дефект вероятнее всего производственный, и не связан с длительной эксплуатацией газопровода. Фактические эксплуатационные свойства металла фрагмента трубы газопровода соответствуют требованиям, предъявляемым к Стали 20, а существенной деградации свойств не обнаружено.

Проведенные исследования второй трубы выявляют почвенную коррозию, по своему типу, скорее всего относящуюся к электротехнической, и обусловленную совместным действием двух факторов: составом грунтов в месте залегания трубы и наличием механического повреждения. В результате это создало концентрацию механических напряжений и способствовало повышению скорости коррозии. Фактические эксплуатационные свойства металла в местах, не подвергнутых коррозии, соответствуют требованиям, предъявляемой к Стали 10, а деградации свойств, в местах не затронутых коррозией, не обнаружено.

Список литературы

1. Махутов Н.А., Пермяков В.Н., Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Захаров Н.С., Резников Д.О. Диагностика и мониторинг состояния сложных технических систем. — Тюмень: ТИУ, 2017. — 632 с.
2. Махутов Н.А., Пермяков В.Н., Ахметханов Р.С., Резников Д.О., Дубинин Е.Ф. Анализ рисков и обеспечение защищенности критически важных объектов нефтегазохимического комплекса. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. — 560 с.
3. Махутов Н.А., Петров В.П., Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Куксова В.И. Некоторые вопросы развития систем упреждающей диагностики // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2010. № 4. — С. 22-48.
4. Махутов Н.А., Петров В.П., Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Куксова В.И. Выбор

параметров и принципы построения систем штатной и аварийной диагностики критически важных объектов и их защиты от комплексных угроз // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2008. № 2. — С. 20-34.

5. Гаркун А.С., Дорошко С.И., Седнин А.В., Абрамовский А.А., Гориченко С.Ф. Механические испытания материалов эксплуатируемых газопроводов // Матеріали 21-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інженерія поверхні та реновація виробів». – Київ: АТМ України, 2021.– С.37-39.

6. Баев А.Р., Майоров А.Л. Асадчая М.В., Седнин А.В., Шавловский Д.В. Ультразвуковой дефектоскопический контроль материалов эксплуатируемых газопроводов // Матеріали 21-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інженерія поверхні та реновація виробів». – Київ: АТМ України, 2021.– С.14-18.

ANALYSIS OF CAUSES OF DESTROYING ELEMENTS OF THE GAS DISTRIBUTION SYSTEM

Sholonik V.E.¹,
Gorichenko S.F.¹,
Anisovich A.G.², D.Sc., Professor,
Garkun A.S.³, Ph.D.
Kren A.P.³, D.Sc., Ass. Professor.
Asadchaya M.V.³, Ph.D.,
Baev A.R.³, D.Sc., Professor,

¹ Mingaz, Ministry of Energy Republic of Belarus

² Institute of Physics and Technology, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

³ Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

Abstract

Analysis of local damage to the pipes of the gas distribution system according to this research methodology revealed a set of the basic technological and operational reasons for the formation of damage in the sections of the system. The studies of the pipes revealed both production defects not associated with the long-term operation of the gas pipeline, and soil corrosion of pipes related to electrical engineering, as well as the combined action of both of them.

Keywords: gas pipeline defects, operation of gas distribution systems, instruments and methods for gas pipeline research.

УДК

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКСИДОВ НА ПОКРЫТИЯХ ИЗ АЛЮМИНИДА НИКЕЛЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

*ЕРЁМИНА Ксения Петровна¹, к.т.н., и.о.научного сотрудника,
e-mail: bksenya_p@bk.ru*
*ХИМУХИН Сергей Николаевич², д.т.н., зам.дир.по научной работе,
e-mail: ximuxin@yandex.ru*

^{1,2} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук

Аннотация

В работе приведены результаты исследований структуры и состава оксидов и микротрещин, формирующихся в области ребер образцов с покрытиями после термоциклирования. Покрытия получали на стали 20Х13 методом электроискрового легирования с использованием интерметаллидного сплава NiAl. В результате термоциклических испытаний на поверхности покрытий образовывались оксидные включения и микротрещины. С использованием растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа проводили исследование изменений структуры и состава различных локальных оксидов и микротрещин на поверхности покрытий. Микротрещины на интерметаллидных покрытиях, образующиеся при получении покрытий методом ЭИЛ и после термоциклирования не являются сквозными. Не увеличивающиеся в размерах при термических циклах оксиды имеют незначительную площадь контакта с поверхностью катода и их влияние на снижение жаростойкости незначительно.

Ключевые слова: сталь 20Х13, метод электроискрового легирования, растровая электронная микроскопия.

Введение

Современному машиностроительному производству для создания деталей машин с высокими эксплуатационными свойствами все в большем количестве требуются новые материалы. Однако в большинстве случаев не целесообразно создавать деталь целиком из нового материала, достаточно сформировать на поверхности соответствующее покрытие. Из большого количества методов, позволяющих формировать покрытия, наиболее востребованы методы, основанные на использовании концентрированных потоков энергии (КПЭ) таких как лазер, взрыв, ионный поток. К числу таких методов относится электроискровое легирование (ЭИЛ) [1], в основе которого лежит электроэрозионный процесс между катодом (деталь) и анодом (материал для нанесения покрытий). Преимуществом метода ЭИЛ является простота технологического процесса получения покрытий, обладающих высокой жаростойкостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью и др. К основным недостаткам можно отнести отсутствие автоматизированных установок, обеспечивающих регулирование процесса нанесения в режиме реального времени и недостаточную сплошность формирующихся покрытий. Для нанесения покрытий применяются электропроводные материалы, среди которых сплавы, содержащие карбиды, нитриды, интерметаллиды. Интерметаллидные сплавы на основе системы Ni-Al широко используются при получении жаростойких покрытий на лопатках техно-

логических газотурбинных агрегатов [2-4], в основном фазового состава Ni_3Al . Применение сплава на основе фазы $NiAl$ затруднено ввиду высоких хрупких свойств этой фазы, хотя ее жаростойкие свойства существенно выше других сплавов системы $Ni-Al$ [5]. Большинство деталей машин с жаростойкими покрытиями эксплуатируется в условиях циклических температурных воздействий различной интенсивности, поэтому от покрытий требуется высокая адгезия к основе в условиях термоциклических нагрузок.

Целью данной работы является установление основных причины снижения жаростойкости интерметаллидных покрытий после термоциклических испытаний.

Методика и материалы

В работе изучали изменение структуры поверхности покрытий после каждого из трех циклов нагрев-охлаждение (термоциклирование). Для получения покрытий на катодах из стали 20Х13 использовали анод, изготовленный из сплава алюминид никеля $NiAl$ (мас.% $Ni - 68$; $Al - 31$) [6].

Нанесение покрытий производили методом ЭИЛ на установке Элитрон-22 А. Термоциклические испытания осуществляли в печи с терморегулятором программируемого типа. Каждый цикл термоциклических испытаний заключается в нагреве до температуры $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью $5-15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, последующей выдержке в течение 15 минут (первый цикл), 30 минут (второй цикл), 45 минут (третий цикл) и постепенном охлаждении с печью. В соответствии с этой методикой после каждого цикла испытаний фиксировали изменение структуры покрытия после охлаждения образцов.

Исследование структуры поверхности покрытий проводили с использованием оптических микроскопов МБС 10, MICRO 200 и растрового электронного микроскопа SU-70 Hitachi с соответствующими приставками (EDX и WDX). Методически эксперименты проводили по следующей схеме. Вначале исследования структуры проводили после формирования покрытий. Затем, после первого нагрева изучались наиболее характерные изменения структуры, выбирались отдельные структурные элементы и исследовался их элементный состав. Выбранные структурные элементы покрытия исследовались после последующих циклов испытаний.

Исследованием структуры покрытий до проведения термоциклирования установлено образование на поверхности покрытий микротрещин, характерных для интерметаллидных сплавов $NiAl$. Количество таких микротрещин увеличивается после каждого цикла термоциклических испытаний. Учитывая известную сложность нанесения ЭИЛ покрытий в области ребер (краевая зона) катода, было проведено исследование оксидов в этой области.

Полученные результаты и обсуждение

Исходя из структурных исследований, покрытия сформированы преимущественно за счет капельного переноса. Растекшиеся капли расплава в виде плоских и волнистых площадок образуют неоднородную псевдозеренную структуру, внутри и по границам которой обнаруживаются несплошности. Сравнительное исследование оксидообразования в различных областях покрытых образцов показало, что наибольшее количество оксидов формируется в краевой зоне.

После первого нагрева было выбрано 3 участка (рисунок 1, а и рисунок 2, а) в краевой зоне образца. На этих участках изучали состав и размерные параметры сформировавшихся оксидов.

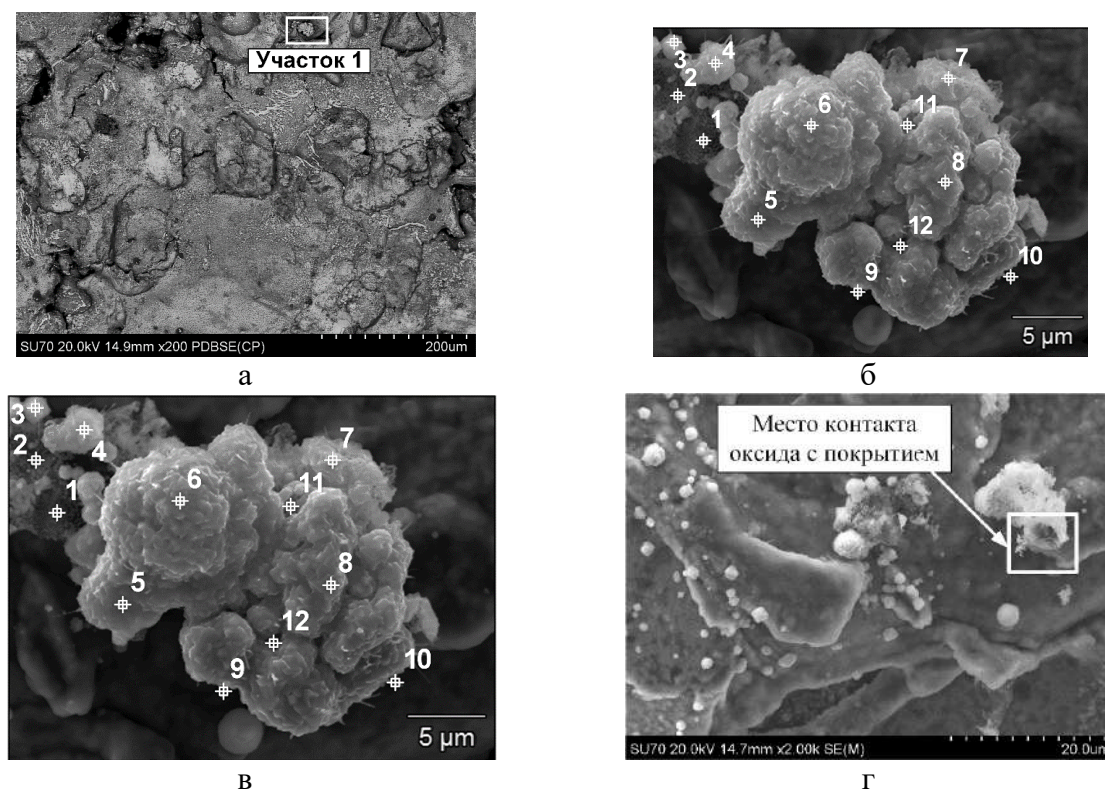


Рисунок 1 – Исследуемый участок №1 на поверхности покрытия, полученного алюминидом никеля на образце из стали 20X13; а – расположение участка на поверхности образца; б, в – оксиды и точки микрорентгеноспектрального анализа после первого (б) и второго (в) нагревов, г – место контакта оксида с покрытием

На рисунке 1, б приведен оксид, обнаруженный после первого нагрева на участке 1. Оксидное включение практически целиком находится на поверхности покрытия, и существенно не изменило свои размеры после второго нагрева (рисунок 1, в). При этом исследования аналогичных оксидов на поверхности покрытия вдали от краевой зоны показали увеличение их размеров от 10 до 23%.

Исследуемый оксид после третьего нагрева разрушился, при этом стало заметно место его контакта с покрытием (область на рисунке 1, г) небольшого размера (до 8 мкм). Маленький размер контакта оксида с покрытием объясняет не только его разрушение, но и незначительный рост его объема после второго нагрева. В результате анализа полученных изображений можно сделать вывод, что формирование подобных оксидных включений происходит на несплошностях границ структурных составляющих.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа после первого и второго испытаний приведены в таблице 1. В точках 5-8 заметно увеличение концентрации О и уменьшение Fe, что объясняется превалированием его окисления по сравнению с диффузией. Выявлено, что за некоторым исключением концентрация элементов в точках на оксиде существенно не изменяется при повторном нагреве (точки 4-8, Al, Fe и Ni, в таблице 1).

На поверхности оксида обнаружены нитевидные кристаллиты, имеющие длину до 1 мкм и диаметр около 100 нм (точки 9 и 10 на рисунке 1 б, в). Микрорентгеноспектральный анализ кристаллов приведен в таблице 1. Результаты элементного анализа из-за малых размеров кристаллитов и близости расположения оксида являются оценочными. Кристаллиты в

основном состоят из окисленных Ni, Fe, Al, причем после второго нагрева содержание Ni уменьшается в 3 раза и увеличивается концентрация O. С большой долей вероятности обнаруженные кристаллиты можно отнести к оксидным вискерам [6]. Формирование вискерообразования происходит из печной атмосферы, содержащей сублимированные оксиды элементов стали и покрытия.

Таблица 1 – Содержание химических элементов в структурных элементах оксида на участке 1 после первого и второго нагревов (рисунок 1, б, в)

Точки анализа	Содержание элементов в точках анализа, ат. %						
	O	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Cu
Рисунок 1, б							
1	38,82	21,10	0,23	0,39	5,52	33,94	-
2	53,32	16,67	0,52	1,29	14,15	14,05	-
3	67,70	11,83	0,06	0,44	12,05	7,02	0,90
4	64,29	5,98	0,14	0,95	22,61	5,24	0,80
5	23,15	11,64	0,18	1,70	51,44	10,37	1,52
6	66,60	2,56	0,17	1,04	22,62	5,84	1,17
7	66,07	5,61	0,16	1,33	20,26	5,73	0,85
8	58,55	2,50	0,31	2,14	32,65	3,24	0,60
9, 10	7,09	6,63		0,31	2,24	82,73	-
11	57,70	13,14	1,11	2,42	21,22	4,01	0,39
12	30,66	6,66	0,59	3,71	52,10	6,27	-
Рисунок 1, в							
1	47,03	24,05	-	0,44	6,52	21,97	
2	43,33	18,83	0,27	1,39	15,68	20,03	0,46
3	67,38	10,18	0,10	0,40	13,81	7,12	0,93
4	64,02	8,24	0,16	0,65	19,57	6,41	0,95
5	23,82	12,03	0,31	1,25	48,84	11,65	2,10
6	66,86	2,72	0,11	0,67	21,39	7,03	1,22
7	67,81	5,20	0,15	0,87	18,06	6,84	1,08
8	57,57	3,00	0,24	1,51	30,35	6,20	0,98
9	43,47	15,98		0,48	14,27	24,90	0,90
10	26,44	20,65		0,52	13,17	37,95	1,27
11	55,43	18,59	0,58	1,39	19,98	3,65	0,37
12	32,55	5,41	0,41	2,50	54,08	4,57	0,49

На рисунке 2, а приведены расположенные рядом два участка с трещинами и, сформировавшимися в них после третьего нагрева, оксидами характерной формы. Необходимо отметить, что при продолжительности обработки близкой к моменту t_{xp} (время образования хрупких трещин в покрытии при достижении предельного времени обработки ЭИЛ) вероятность формирования трещин в покрытии возрастает.

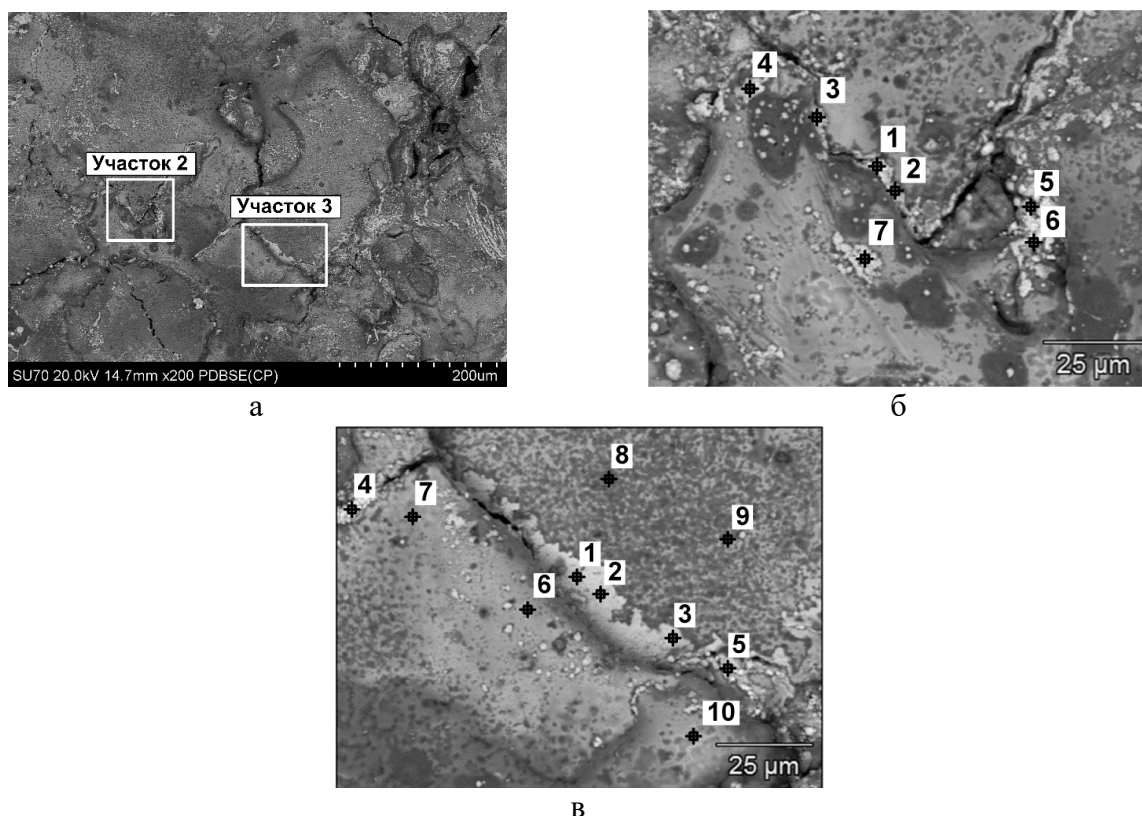


Рисунок 2 – Исследуемые участки № 2 и 3 на поверхности покрытия, полученного алюминидом никеля на образце из стали 20X13; а – расположение участков на поверхности образца; б, в – оксиды и точки микрорентгеноспектрального анализа на участке №2 (б) и участке №3 (в)

На участках 2 и 3 (рисунок 2, б и рисунок 2, в) форма оксидов несколько отличается от приведенных выше. В этом случае окисление происходит по поверхности с образованием плен и локальных включений. Оксид в виде локальных включений содержит в 2 раза больше Ni, и меньше Al, тогда как состав пленки по элементному составу ближе к алюминиду никеля (таблица 2). Локальные включения оксидов с высоким содержанием Ni по-видимому формируются в результате его диффузии на поверхность покрытия. Доказательством этого является преимущественное их расположение в области трещин, где создаются облегченные условия диффузии Ni. Кроме этого необходимо отметить, что в составе оксидов на исследуемых участках содержание Fe и Cr не достигает 1% (таблица 2), что позволяет охарактеризовать данные трещины как поверхностные, не достигающие стальной основы.

Необходимо отметить, что достоверное установление фазового состава сформировавшихся в покрытиях оксидов по результатам микрорентгеноспектрального и рентгенофазового анализов затруднено по ряду причин. Покрытия, полученные методом ЭИЛ, изначально имеют неоднородное строение, и состав. После нагрева (при испытаниях на жаростойкость) дополнительно формируются оксидные пленки, имеющие слоистое строение, изменяющееся по толщине. Поэтому установление фазового состава оксидов, находящихся на поверхности покрытий представляет отдельную задачу. Однако, исходя из литературных данных и результатов микрорентгеноспектрального анализа, можно предположить, что, по-

видимому, оксидные пленки на образцах в большей части состоят из оксидов шпинельного типа и оксидов комплексного состава.

Таблица 2 – Содержание химических элементов в различных структурных элементах оксидов на участках 2 и 3 после третьего нагрева (рисунок 2, б, в)

Точки анализа	Содержание элементов в точках анализа, ат. %				
	O	Al	Cr	Fe	Ni
Рисунок 2, б					
1	40,50	4,53	-	0,33	54,64
2	50,01	9,80	-	0,20	40,00
3	58,95	8,23	-	0,19	32,63
4	24,32	5,20	0,20	0,40	69,88
5	44,04	8,21	0,16	0,31	47,28
6	57,03	4,28	0,09	0,34	38,26
7	59,38	4,92	-	0,20	35,49
Рисунок 2, в					
1	45,38	29,07	0,06	0,13	25,35
2	47,84	25,84	-	0,16	26,16
3	50,16	26,64	-	0,13	23,06
4	63,03	2,31	-	0,20	34,45
5	37,85	14,39	-	0,86	46,90
6	48,08	33,44	0,09	0,14	18,24
7	47,09	34,19	0,06	0,13	18,53
8	45,97	37,40	0,07	0,20	16,36
9	45,19	36,19	0,07	0,16	18,39
10	42,48	33,18	0,20	0,22	23,93

Выводы

1. Установлен преимущественно капельный механизм формирования покрытий, полученных методом ЭИЛ на образцах стали 20X13 с использованием интерметаллидного сплава Ni-Al.
2. Микротрещины, образующиеся на поверхности покрытий, как после формирования методом ЭИЛ, так и после термоциклирования не являются сквозными.
3. Оксиды, не увеличивающиеся в размерах при термических циклах, имеют незначительную площадь контакта с поверхностью катода и их вклад в уменьшение жаростойкости незначителен.
4. Показано, что исходя из элементного состава оксидов в области микротрещины, можно определить, является ли она сквозной.

Список литературы

1. S.N. Khimukhin, H. Ri, A.D. Verkhoturov, E.H. Ri, The formation of the layer structure on metals and alloys during electrospark processing, Publishing House of the FESTU, Khabarovsk. (2010)
2. Sudhangshu Bose, High Temperature Coatings, 2-nd Edition, Chapter 6: Oxidation and Corrosion-Resistant Coatings, UK, Oxford: Butterworth-Heinemann, (2018) 97–198.

3. Nuria Cinca and Luis, Transition Metal Aluminide Coatings and Initial Steps on Additive Manufacturing, Intermetallic Compounds - Formation and Applications, edited by Mahmood Aliofkhazraei, Croatia. (2018) 167–191.
4. M.J. Pomeroy, Coatings for gas turbine materials and long-term stability issues/ M.J. Pomeroy, Materials and Design. 26 (2005) 223–231.
5. P. Nash, M.F. Singleton, J.L. Murray, Al-Ni (Aluminium-Nickel)/ P.Nash, Phase Diagrams of Binary Nickel Alloys, Materials Park, OH: ASM International. (1991) 3–11.
6. Ri E.H., Eremina K.P., Besedin A.A. Microstructure of nickel aluminid obtained by centrifugal-*now* casting, Metallurgy of Machinery Building, 6, 34–35, (2019).
7. V.G. Dubrovskii, G.E. Cirlin, V.M. Ustinov, Semiconductor nanowhiskers: Synthesis, properties, and applications. Semiconductors 43 (2009) 1539–1584.

INVESTIGATION OF OXIDES ON NICKEL ALUMINIDE COATINGS OBTAINED BY THE METHOD OF ELECTROSPARK DEPOSITION

Khimukhin Sergey Nikolaevich¹, e-mail: ximyxin@yandex.ru

Eremina Kseniya Petrovna², e-mail: bkzenya_p@bk.ru

¹ Institute for Materials Technology, Khabarovsk Research Centre at the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Research, e-mail: ximyxin@yandex.ru, Khabarovsk, Russia

² Institute for Materials Technology, Khabarovsk Research Centre at the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Acting Researcher, e-mail: bkzenya_p@bk.ru, Khabarovsk, Russia

Abstract

The paper presents the results of studies of the structure and composition of oxides and microcracks formed in the region of the edges of coated samples after thermal cycling. The coatings were obtained on steel AISI 420 by the method of electrospark deposition (ESD) using anode of intermetallic alloy NiAl. Oxide inclusions and microcracks were formed in the coating surface as a result of the thermal cycling tests. The changes in the structure and composition of various local oxides and microcracks on the coating surface were studied using scanning electron microscopy and X-ray microspectral analysis. Microcracks, which appeared in the intermetallic coatings formed by the ESD method and after thermal cycling, are not through. Oxides that do not increase in size during thermal cycling have quite small contact area with the cathode surface thus their effect on the decrease of steel heat resistance is insignificant.

СЕКЦИЯ 3

*Горное
машиностроение*

SECTION 3

*Mining machinery
manufacturing*

УДК 622.684

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО ВЛИЯНИЯ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ
НА ДВИГАТЕЛЬ CUMMINS КТА 50 ГАЗОДИЗЕЛЬНЫХ КАРЬЕРНЫХ
САМОСВАЛОВ БелАЗ 75131**

*ДУБОВ Георгий Михайлович¹, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: nikokem@mail.ru*

*БОГОМОЛОВ Александр Романович^{1,2}, доктор техн. наук, доцент,
e-mail: barom@kuzstu.ru*

*НОХРИН Сергей Алексеевич³, заместитель генерального директора
по газификации автотранспорта,
e-mail: nsa500@mail.ru*

*ТРУХНОВ Леонид Иванович⁴, первый заместитель генерального конструктора –
главный конструктор по карьерной технике,
e-mail: trucknew@mail.ru*

¹Кузбасский государственный технический университет им Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

²Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, д. 1

³ООО «ТехноЭко», 653046, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Прокопьевск, ул.
Азовская, 11

⁴ОАО «БЕЛАЗ» - управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», 222161,
Республика Беларусь, г. Жодино, ул. 40 лет Октября 4

Аннотация

Приведены результаты исследования влияния низкой концентрации антикоррозионных присадок в охлаждающей жидкости на образование коррозии, накипи и поверхностных раковин на охлаждающих рубашках и гильз блока цилиндров двигателя Cummins КТА 50 газодизельного карьерного самосвала БелАЗ 75131. Также исследовано негативное влияние присутствия в маслосистеме двигателя охлаждающей жидкости. Утверждается, что даже незначительная концентрация в масле двигателя охлаждающей жидкости приводит к проявлению на особо нагруженных участках двигателя (кривошипно-шатунных вкладышах, втулках распределительных валов) кавитации с сопутствующим образованием каверн или значительных и глубоких «язвенных» разрушений, оспин. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что охлаждающая жидкость, при наличии в ней недостаточной концентрации антикоррозионных присадок, а также при проникновении её в маслосистему оказывает достаточно весомое влияние на износ и разрушение поверхностного слоя деталей двигателя внутреннего сгорания.

Ключевые слова: карьерный самосвал БелАЗ, двигатель внутреннего сгорания, система охлаждения, охлаждающая жидкость, коррозия, накипь, раковины, оспины, питтинг, кавитация.

Введение

В горнодобывающей промышленности способ добычи полезных ископаемых открытым способом занимает лидирующее место. При этом на ближайшую перспективу первенство будет занимать именно этот способ добычи. Интенсивная эксплуатация карьерной техники, осуществляющей транспортировку горной массы, сопровождается большим количеством её простоев, по причине выхода из строя её узлов и агрегатов [1-4].

Снижение надежности узлов и агрегатов, в частности двигателей карьерных самосвалов, происходит, в том числе и за счет снижения их ресурса, связанного с коррозионным влиянием охлаждающей жидкости, проникающей в маслосистему соединения через прокладки даже в небольших количествах.

При транспортировке горной массы, в горнодобывающих компаниях России наибольшее распространение получили тяжелые карьерные самосвалы БелАЗ 5131 и их модификации. Самосвалы БелАЗ 75131 оснащаются в основном дизельными двигателями внутреннего сгорания (ДВС) Cummins KTA 50 [5-7].

Обеспечение оптимальной и эффективной эксплуатации ДВС газодизельного карьерного самосвала БелАЗ- 75131, обеспечивается своевременным отводом тепла от его наиболее нагруженных узлов и участков. Эту функцию выполняет система охлаждения, в частности находящаяся в ней охлаждающая жидкость, обладающая высокой теплоемкостью и теплоотдачей. В качестве охлаждающей жидкости используют антифризы [8].

Тяжелые условия работы карьерных самосвалов на участках горных выработок, где транспортировка горной массы осуществляется по серпантину при больших углах подъема технологических трасс, приводят к достаточно большим нагрузкам на двигатель самосвала. Это в конечном итоге сопровождается значительным нагревом его узлов, а также системы охлаждения. Охлаждающие жидкости в этом случае работают при переменных температурах в условиях контактирования с катализаторами. Катализаторами окисления являются такие металлы, как медь, алюминий, сталь, оловянный припой [9-11].

В процессе эксплуатации карьерных самосвалов происходит изменение физико-химических свойств охлаждающей жидкости, старение, засорение механическими примесями, срабатывание присадок, вследствие чего увеличивается коррозионное воздействие охлаждающей жидкости на поверхности охлаждения. Кроме этого, при попадании в маслосистему охлаждающей жидкости, проникающей через неплотности соединений в ДВС, происходит разрушение особо напряженных мест двигателя сопровождающееся образованием оспин, коррозии, накипи и поверхностных раковин [12].

В реальных условиях эксплуатации скорость коррозии системы охлаждения двигателя изменяется по сложным зависимостям в связи с не стационарностью процессов теплообмена. Согласно пленочной теории пассивное состояние металла при добавлении в охлаждающую жидкость ингибиторов коррозии происходит за счет образования многослойной пленки продуктом взаимодействия активных компонентов присадки с металлом в результате адсорбции поверхностно-активных веществ на поверхность металла [13].

Целью представленной работы является исследование коррозионного воздействия охлаждающей жидкости на дизельный двигатель внутреннего сгорания Cummins KTA 50 газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ 75131.

Описание экспериментальных исследований

Влияние низкой концентрации антикоррозионных присадок в охлаждающей жидкости на образование коррозии, накипи и поверхностных раковин на охлаждающих рубашках и гильзах блока цилиндров двигателя Cummins KTA 50 определялось посредством визуального

исследования. Для обоснования образования питтинговой коррозии на охлаждаемых нагруженных поверхностях кривошипно-шатунного вкладыша R6 двигателя Cummins KTA-50 карьерного самосвала БелАЗ 75131 были проведены исследования места разрушения и нормального состояния рабочей поверхности посредством сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6390 LV с энергодисперсионной приставкой JED 2300. Экспериментальные исследования проводились в следующих условиях: регистрация карт распределения химических элементов проводилась с участка площадью 9 мм² при ускоряющем напряжении – 20 кВ и токе зонда – 1 нА; разрешающая способность энергодисперсионного детектора составляла 133 эВ.

Результаты и обсуждения

На первоначальном этапе исследований особое внимание было уделено изучению влияния концентрации присадок в охлаждающей жидкости (ОЖ) на образование раковин, коррозии и накипи в системе охлаждения двигателя внутреннего сгорания (ДВС) Cummins KTA 50 газодизельного карьерного самосвала БелАЗ 75131.

При проведении анализа ОЖ было выявлено, что концентрация антикоррозионных присадок DCA (обеспечивающей защиту от питтинговой коррозии) в ОЖ составляла 0,3 единицы на 1 литр, что соответствует 1000 промилле нитритов (в пересчете на NO₂). В технических требованиях компании Cummins (США) к охлаждающей жидкости и обслуживанию систем охлаждения ДВС указано, что в растворах охлаждающей жидкости с содержанием антифриза 40-60% концентрация антикоррозионных присадок SCA (обеспечивающей защиту от питтинговой коррозии) должна составлять 0,6 единиц на литр. В руководстве по эксплуатации и техническому обслуживанию ДВС Cummins серии K38 и K50 отмечено, что рекомендуется использовать ОЖ Fleetguard®, содержащую присадку DCA 4, хотя допускается использование ОЖ, содержащих присадку DCA 2. Также рекомендовано восполнять естественную убыль присадок в ОЖ путем замены фильтров ОЖ или добавлением жидких присадок SCA. Объемные системы охлаждения могут потребовать дополнительных жидких присадок SCA, если стандартные фильтры ОЖ не в состоянии обеспечить необходимое восполнение присадок SCA [14-15].

Компанией Cummins (США) рекомендовано осуществление проверки уровня концентрации присадок SCA не реже, чем два раза в год. Для достаточно объемных систем охлаждения количество присадок SCA восполняется с помощью химического фильтра и жидких присадок SCA. Если уровень концентрации присадок SCA находится в пределах 0,3–1,3 единиц на литр, необходимо устанавливать химический фильтр, содержащий необходимое количество присадок SCA, или добавлять соответствующее количество жидких присадок SCA при этом устанавливать фильтр, не содержащий химикатов. Если уровень концентрации присадок SCA ниже 0,3 единиц на литр, необходимо добавлять 0,15 литра присадки Fleetguard® DCA4 или Fleetcool liquid на каждые 3,8 литра емкости системы охлаждения и установить химический фильтр. В случае снижения уровня концентрации присадок SCA ниже 1,3 единиц на литр, необходимо вернуться к установке химических фильтров или добавке необходимого количества жидких присадок SCA и установке фильтров не содержащих химикатов [14].

Учитывая вышеприведенные данные, становится очевидным тот факт, что исследованная ОЖ имела низкую концентрацию антикоррозионных присадок по числу единиц на литр. Таким образом, охлаждение двигателя Cummins KTA 50, осуществлялось ОЖ с нижним пределом концентрации антикоррозионных присадок. Это впоследствии привело к по-

явлению поверхностных раковин на гильзах цилиндров, коррозии и накипи системы охлаждения двигателя Cummins KTA-50.

Обоснованным выводом об использовании некондиционной (низкая концентрация присадок в ОЖ) охлаждающей жидкости является наглядное состояние поверхности охлаждающих рубашек блока цилиндров со стороны ОЖ, представленных на рис 1. Видны следы коррозии и накипи, а также поверхностные раковины на поверхности охлаждающих рубашек блока цилиндров двигателя Cummins KTA 50.



Рисунок 1 – Поверхности охлаждающих рубашек блока цилиндров со стороны ОЖ двигателя Cummins KTA 50 газодизельного карьерного самосвала БелАЗ 75131

Как известно, при эксплуатации ДВС, возможна утечка, даже в незначительном количестве ОЖ в маслосистему. Практика показывает, что утечка происходит в основном в напряженных местах, а также местах соединения блока цилиндров. Наличие ОЖ в маслосистеме ДВС впоследствии приводит к питтинговой коррозии соприкасающихся поверхностей по причине низкой концентрации гликоля в ОЖ, что в конечном итоге, при высоких температурах, приводит к вскипанию низко концентрированного антифриза.

Одним из ярких примеров может служить образование питтинговой коррозии на охлаждаемых нагруженных поверхностях вкладышей подшипников скольжения коленчатого вала ДВС, где кроме масла присутствует охлаждающая жидкость, которая проникает через неплотности соединений в ДВС. Наличие ОЖ в масле ДВС приводит к вскипанию ОЖ на горячей нагруженной рабочей поверхности подшипников скольжения, которое впоследствии приводит к явлению кавитации (вскипание и схлопывание пузырьков пара у поверхности с образованием каверн или обычно – значительных и глубоких «язвенных» разрушений).

Пример образования питтингово разрушения на рабочей поверхности вкладыша R6 двигателя Cummins KTA 50 газодизельного карьерного самосвала БелАЗ 75131 представлен на рис. 2. Как можно увидеть из рисунка 2 на рабочей поврежденной поверхности вкладыша наблюдается характерная картина следов уноса металла в виде оспин – так называемый питтинг (рис. 3), который в том числе связан с присутствием низкокипящей жидкости (ОЖ) в смеси с высококипящим моторным маслом.

На поверхности вкладыша наблюдаются также вкрапления частиц меди, кальция и фосфора (выделенные области на микрофотографиях рис. 4). При этом пространственное совпадение на картах распределения этих элементов с большой вероятностью связано с фосфатом кальция, образование которого может быть связано с попаданием ОЖ в масло.

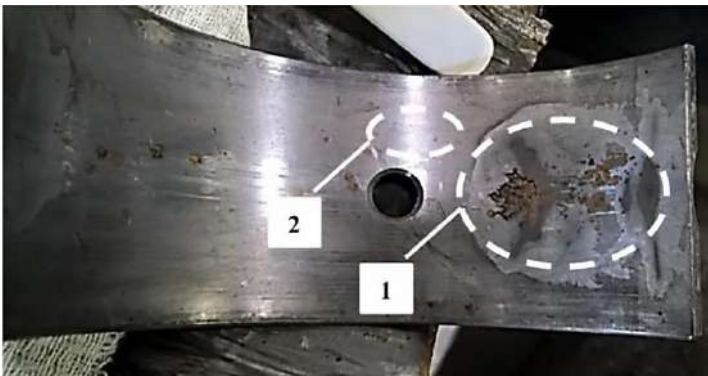


Рисунок 2 – Питтинговое разрушение (поз.1) и неразрушенный участок (поз.2) на поверхности кривошипно-шатунного вкладыша R6 двигателя Cummins KTA 50

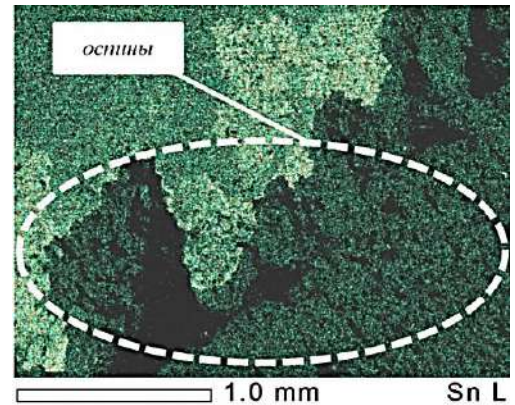


Рисунок 3 – Повреждённая поверхность (в виде острий – питтинга) вкладыша R6 двигателя Cummins KTA 50

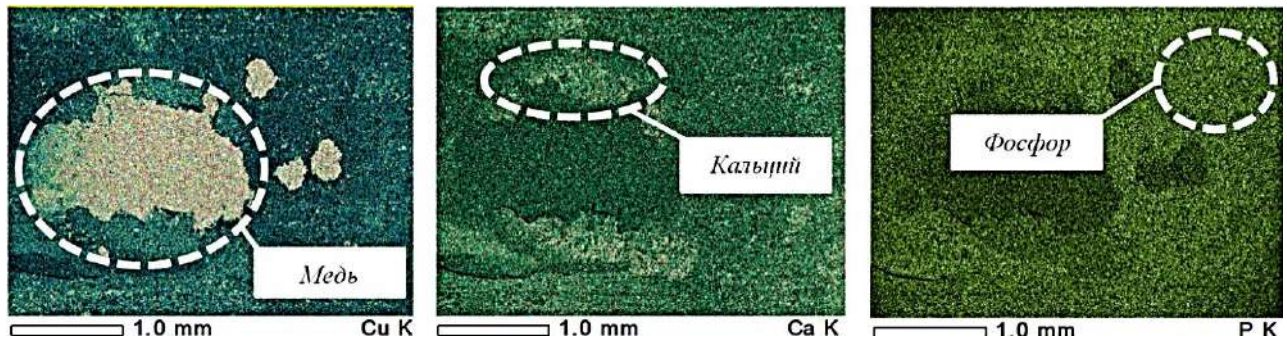


Рисунок 4 Вкрапления меди, кальция и фосфора на вкладыше R6 двигателя Cummins KTA 50

В свою очередь исследование не разрушенного участка (рис.2, поз. 2) рабочей поверхности кривошипно-шатунного вкладыша R6 двигателя KTA 50 газодизельного карьерного самосвала БелАЗ 75131 показало и работоспособное (неповрежденное) состояние участков поверхности вкладыша (рис. 5). Таким образом, очевидным становится тот факт, что питтинговая коррозия (разрушение) имеет избирательный (точечный) характер действия.

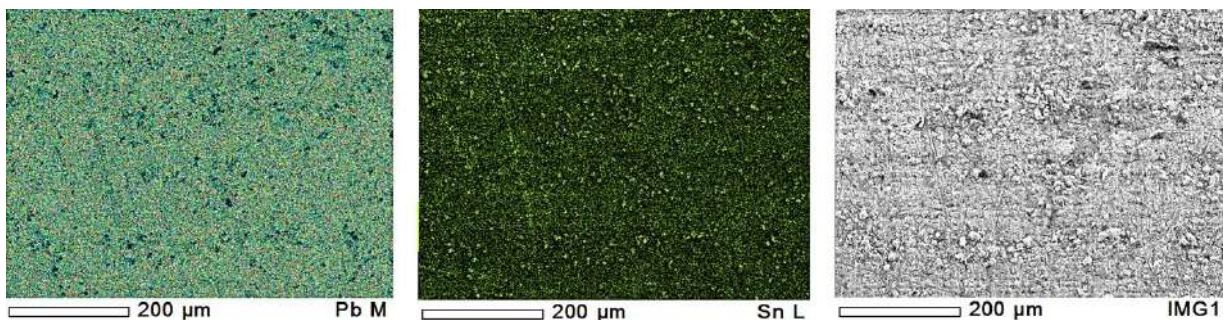


Рисунок 5 – Не повреждённая поверхность вкладыша R6 двигателя Cummins KTA 50

Представленные металлографические исследования показали, что при проникновении даже в незначительных количествах ОЖ в маслосистему ДВС приводит к питтинговой коррозии, вследствие кавитации ОЖ при соответствующих температурных условиях работы двигателя, в напряженных местах ДВС, где происходят максимальные нагрузки, связанные, прежде всего, с работой тел вращения в ДВС карьерного самосвала.

Для подтверждения приведенных выше доводов и обоснованного утверждения проникновения и наличия ОЖ в маслосистеме ДВС и оказывающей непосредственное влияние на образование питтинговой коррозии, которая не характерна для имеющейся наработки ДВС по моточасам (3760 м/ч), проведено исследование состояния втулок распределительных валов ДВС Cummins KTA 50, (рис. 6).

Как можно увидеть из рис. 6, втулки распределительных валов двигателя Cummins KTA 50 газодизельного карьерного самосвала БелАЗ 75131 также, как и вкладыши R6 кривошипно-шатунного механизма, подвергались питтинговой коррозии, с образованием значительных и глубоких «язвенных» разрушений (оспин) вследствие присутствия низкокипящей жидкости (ОЖ) в составе масла ДВС Cummins KTA 50 газодизельного карьерного самосвала БелАЗ 75131.



Рисунок 6 – Питтинговая коррозия на втулках распределительных валов двигателя Cummins KTA 50 газодизельного карьерного самосвала БелАЗ 75131

Выводы

1. Проведенные исследования показали, что низкая концентрация антикоррозионных присадок в охлаждающей жидкости двигателя Cummins KTA 50, в процессе его эксплуатации, приводит к образованию коррозии, накипи, а также поверхностных раковин на поверхностях двигателя взаимодействующих с охлаждающей жидкостью.

2. Обеспечение необходимой концентрации антикоррозионных присадок в охлаждающей жидкости, регламентируемой нормативными документами завода изготовителя двигателей Cummins (США), позволит повысить ресурс эксплуатации ДВС и его эффективную и безотказную работу.

3. Присутствие (даже незначительное) охлаждающей жидкости в маслосистеме двигателя Cummins KTA 50 приводит в последствии к возникновению явления кавитации на горячих нагруженных рабочих поверхностях ДВС сопровождающееся образованием каверн, глубоких «язвенных» разрушений, оспин.

4. Обеспечение плотности сопрягаемых соединений в узлах и элементах ДВС позволит минимизировать попадание охлаждающей жидкости в маслосистему и тем самым способствовать снижению питтинговой коррозии соприкасающихся (взаимодействующих) поверхностей.

Список литературы

1. Кудреватых А.В., Ащеулов А.С., Ащеулова А.С. Методика определения технического состояния редукторов мотор-колеса автосамосвалов БЕЛАЗ по параметрам масла // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2020. – № 1 (137). С. 49-55. – DOI: 10.26730/1999-4125-2020-1-49-55.
2. Stenin D.V., Stenina N.A., Bakanov A.A. Evaluation of the open pit vehicles loading influence on the reliability of motor – wheel reducers // Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety. – Kemerovo, Russia: ATLANTIS PRESS. – 2016. – P. 256-260.
3. Кудреватых А.В., Ащеулов А.С., Ащеулова А.С. Сравнительная характеристика процесса износа редукторов экскаваторов и карьерных самосвалов // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – №5. – С. 51-56. – DOI: 10.26730/1816-4528-2020-5-51-56.
4. Kudrevatykh A.V., Ashcheulov A.S., Ashcheulova A.S., Karnadud A.S., Rattmann L. Actual Technical Condition Assessment of A Motor-Wheel Gear of A Dump Truck Belaz Based on the Operating Oil Parameters // E3S Web of Conferences: Kemerovo. – 2019. – P. 03021. – DOI: 10.1051/e3sconf/201910503021.
5. Хорешок А.А., Кудреватых А.В. О мониторинге состояния редукторов экскаваторов на основе изменения температуры масла // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности. Сборник трудов XIV международной научно-практической конференции. – Кемерово: Институт угля СО РАН. – 2012. – С. 122-124.
6. Кузнецов И.В., Паначев И.А., Дубов Г.М., Нохрин С.А.. Энергетическая оценка эксплуатации газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ-75131 на разрезах Кузбасса // «Справочник. Инженерный журнал». – Москва: «СПЕКТР». – 2019. – №4 (265). С. 19 - 23. DOI: 10.14489/hb.2019.04. pp. 019-023.
7. Kuznetsov I.V., Panachev I.A., Dubov G.M., Nokhrin S.A. Energy Assessment of BelAZ-75131 Gas-diesel Mining Dump Trucks Operation at Kuzbass Open Casts // Vth International Innovative Mining Symposium. – Kemerovo, Russian Federation, October 19 - 21, 2020. – E3S Web of Conferences 174, 03010 (2020). – p.8. DOI: 10.1051/e3sconf/202017403010.
8. Картошкин А.П., Спиридонова А.Н. Коррозионное воздействие охлаждающих жидкостей на металлы при эксплуатации // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – С. 162-167. – DOI 10.24411/2078-1318-2019-14162.
9. Якубович А.И., Кухаренок Г.М., Тарасенко В.Е. Системы охлаждения двигателей тракторов и автомобилей. Конструкция, теория, проектирование. – Минск: БНТУ. – 2011. – 436 с.
10. Дубов Г.М., Богомоллов А.Р., Григорьева Е.А., Нохрин С.А. Анализ причин роста концентрации свинца в отработавшем масле ДВС КТА 50 карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих по газодизельному циклу // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 3. – С.84-93. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-3-84-93.
11. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Kuznetsov I.V., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Prospects for the use of liquefied natural gas as a motor fuel for haul trucks // IVth International Innovative

Mining Symposium: E3S Web of Conferences 105, 03018 (2019). DOI: 10.1051/e3sconf/201910503018.

12. Картошкин А.П. Технологические жидкости для автотракторной техники: справочник. – Москва: Издательский центр «Академия». –2012. – 240 с.

13. Сафонов А.С., Ушаков А.И., Гришин В.В. Химмотология горюче-смазочных материалов: эффективность энергообразования, смазки, охлаждения: качество топлив, моторных масел, охлаждающих жидкостей //Санкт-Петербург: НПИКЦ – 2007. – 488 с.

14. Технические требования фирмы Камминс к охлаждающей жидкости и обслуживанию систем охлаждения / Камминз Энджин. Компани. Инк. – Издано в США. Номер сервисного бюллетеня 4960814-04. – 2005.– 39 с.

15. Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию двигателей Камминз серии К38 и К50 / Камминз Энджин. Компани. Инк. – Издано в США. Номер сервисного бюллетеня 3810497-02. – 1993. – 288 с.

RESEARCH OF COOLING LIQUID CORROSION EFFECT ON CUMMINS KTA 50 ENGINE OF GAS-DIESEL BelAZ 75131 DUMP TRUCK

¹ **Dubov G.M.**, C. Sc. (Engineering), Associate Professor, e – mail: nikokem@mail.ru

^{1,2} **Bogomolov A.R.**, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, e – mail: barom@kuzstu.ru

³ **Nokhrin S.A.**, (Engineering), Deputy General Director for Gasification of Motor Transport, e – mail: nsa500@mail.ru

⁴ **Truhnov L.I.**, (Engineering), Deputy General Designer, Chief Designer in Maining Equipment, e – mail: trucknew@ mail.ru

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Vesennyaya St., 28, Kemerovo, Russian Federation

²Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Academician Lavrentyev Prospect, 1, Novosibirsk, Russian Federation

³«TekhnoEco» LLC, 653046, Azovskaya St., 11, Prokopyevsk, Kemerovo region – Kuzbass, Russian Federation

⁴ОАО «BELAZ» - Management Company of Holding «BELAZ-HOLDING», 222161, 40 let Ochyabrya St., 4, Zhodino, Minsk region, Republic of Belarus

Abstract

The results of the study of the effect of low concentration of anti-corrosion additives in the coolant on corrosion, scaling and pitting of the cooling jackets of the cylinder block of the Cummins KTA 50 engine of the BelAZ 75131 gas-diesel dump truck are presented. The negative influence of the presence of coolant in the engine oil system has been studied. It is argued that even an insignificant concentration of coolant in the engine oil leads to cavitation with the concomitant formation of caverns or significant and deep pits - pockmarks - on especially loaded parts of the engine (crank-connecting rod liners, camshaft bushings). The conducted studies allow concluding that the coolant, in the presence of an insufficient concentration of anti-corrosion additives in it, as well as when it penetrates into the oil system, has a sufficiently significant effect on the wear and destruction of the surface layer of the internal combustion engine parts.

Keywords: BelAZ dump truck, internal combustion engine, cooling system, coolant, corrosion, scale, cavities, pockmarks, pitting, cavitation.

УДК 622.684

РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА БелАЗ, РАБОТАЮЩЕГО ПО ГАЗОДИЗЕЛЬНОМУ ЦИКЛУ

*ДУБОВ Георгий Михайлович¹, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: nikokem@mail.ru*

*БОГОМОЛОВ Александр Романович^{1,2}, доктор техн. наук, доцент,
e-mail: barom@kuzstu.ru*

*АЗИХАНОВ Сергей Сейфудинович^{1,2}, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: ass.pmahp@kuzstu.ru*

*НОХРИН Сергей Алексеевич³, заместитель генерального директора,
по газификации автотранспорта, e-mail: nsa500@mail.ru*

¹Кузбасский государственный технический университет им Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

²Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1

³ООО «ТехноЭко», 653046, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Прокопьевск, ул. Азовская, 11

Аннотация

Рассмотрены перспективы использования природного газа в качестве моторного топлива. Проведен анализ работы карьерного самосвала БелАЗ 75131 на газодизельном топливе, в котором используется сжиженный природный газ. Приведена схема питания двигателя сжиженным природным газом. Произведен расчет системы подачи сжиженного природного газа при замещении дизельного топлива на 30%. Разработан измерительный комплекс для контроля количества подаваемого природного газа. Комплекс позволяет получить данные о мгновенном расходе газа и общем расходе за промежуток времени. Используемый в составе комплекса гаситель пульсаций позволил уменьшить пульсации газа в трубопроводах после форсунок, создать условия к использованию диафрагменных расходомеров, обеспечил равномерную подачу природного газа в оба ряда цилиндров, что благоприятно сказалось на работе двигателя.

Ключевые слова: карьерный самосвал БелАЗ, моторное топливо, сжиженный природный газ, криогенная бортовая топливная система, измерительный комплекс.

Введение

Оптимизация эколого-экономических требований к карьерной технике для горнодобывающих компаний является на сегодняшний день одной из актуальных задач. Это напрямую связано с постоянным ростом объемов добычи полезных ископаемых обусловленным все возрастающим мировым объемом промышленного производства [1].

Газовое топливо на сегодняшний день является альтернативой традиционному моторному топливу. Природный газ является наиболее экономичным, экологичным и безопасным видом топлива. Проведённые исследования свидетельствуют о том, что энергоёмкость процесса транспортирования горной массы карьерными самосвалами, работающими в двухтоп-

ливном (газодизельном) режиме меньше, чем для карьерных самосвалов работающих только на дизельном топливе [2-9].

Россия является мировым лидером по запасам природного газа. По итогам 2020 года в России потребление газа в качестве моторного топлива составило 1,1 млрд. м³. Согласно долгосрочной государственной стратегии развития газомоторного рынка к 2030 году планируется увеличить этот показатель до 11 млрд. м³. В последние годы наблюдается интенсивное развитие газомоторной техники. Принятые международные стратегии по снижению выбросов парниковых газов, уменьшению выбросов оксидов азота и серы будут способствовать поиску альтернативных источников энергии [10].

Качественные характеристики природного газа, используемого, как моторное топливо, распределяются в следующем порядке:

1. непосредственно сами моторные качества, а именно критерии, влияющие на течение процесса горения, а также и всех рабочих процессов происходящих при эксплуатации двигателя внутреннего сгорания;

2. особенности, влияющие на функционирование топливной аппаратуры транспортного средства;

3. параметры, обуславливающие технические условия производства газомоторного топлива и его транспортировки до заказчика.

Рациональность применения в качестве моторного топлива природного газа - метан в основном предопределяются критериями первой группы.

Газ, как газомоторное топливо, используется в компримированном или сжиженном состояниях. Основными потребителями компримированного природного газа (КПГ) выступают легковой, пассажирский, легкий грузовой транспорт. Основными потребителями сжиженного природного газа (СПГ) является водный, магистральный грузовой автотранспорт, карьерная и сельскохозяйственная техника [11-15].

Описание экспериментальных исследований

Энергетические показатели газа, зависящие от теплоты его сгорания, определяют его моторные качества. Предельная теплота сгорания горючих компонентов природного газа (предельных углеводородов) может быть определена по формуле:

$$Q_{vm} = 221,8 + 672,66n - 1,7778n^2, \text{ кДж/моль}, \quad (1)$$

Где, n – число атомов углерода.

Таблица 1 – Предельная теплота сгорания углеводородных газов

Наименование газа	Химическая формула	Теплота сгорания, кДж/моль		Погрешность расчета
		Справочные данные	По формуле (1)	
Метан	CH ₄	891,6	892,5	0,10
Этан	C ₂ H ₆	1562,1	1559,9	0,14
Пропан	C ₃ H ₈	2223,2	2223,6	0,02
Нормальный бутан	CH ₃ -CH-CH-CH ₃	2882,6	2886,2	0,12
Нормальный пентан	CH ₃ -CH-CH-CH-CH ₃	3541,2	3540,6	0,02

Низшая теплота сгорания природных газов, может быть рассчитана по приведенной формуле (2):

$$Q_{nv} = 7532 \sum_1^n r_n + 26290 \sum_1^n nr_n + 73,9 \sum_1^n n^2 r_n, \text{ кДж/м}^3, \quad (2)$$

где, r_n – объемная доля в смеси газа, содержащего n атомов углерода в молекуле.

Фактические значения теплоты сгорания и объемной стехиометрической смеси природного газа различных месторождений приведены в таблице 2. Как можно увидеть из данных представленных в таблице 2 низшие и высшие теплоты сгорания значительно отличаются для различных месторождений. Наибольшие значения теплоты сгорания принадлежат природному газу Вуктылского месторождения. В составе этого газа большее содержание тяжелых алканов и меньшее количество метана. Объемная же теплота сгорания стехиометрической смеси природного газа практически одинакова для газов перечисленных в таблице месторождений.

Таблица 2 – Характеристики природного газ

Месторождение	Теплота сгорания, кДж/м ³		Объем воздуха, необходимого для сгорания 1 м ³ газа, м ³ /м ³	Объемная теплота сгорания стехиометрической смеси, кДж/м ³
	низшая, Q_n	высшая, Q_v		
Ухтинское	33294	36923	8,84	3383
Саратовское	35866	39763	9,50	3415
Бугурусланское	36830	40643	9,72	3435
Курдюмское	33684	37392	8,94	3408
Мелитопольское	35158	39051	9,34	3400
Дашавское	35711	39633	9,48	3407
Ставропольское	35568	39470	9,44	3408
Шебелинское	35515	39344	9,41	3411
Коми	34312	37987	9,09	3401
Газлинское	36956	40982	9,80	3421
Волгоградское	35506	39386	9,42	3407
Астраханское	36830	40794	9,75	3425
Найпское	36667	40702	9,73	3417
Оренбургское	37132	41054	9,85	3412
Вуктылское	47007	51621	12,40	3507
Шатлыкское	36227	40224	9,62	3411

Такая взаимосвязь обусловлена стехиометрически необходимым, соответствующей прямо пропорциональной зависимости между теплотой сгорания и объемом воздуха, затрачиваемым на сгорание 1 м³ газа. Как следует из таблицы 2, основная масса природных (углеводородных) газов имеет высокую теплоту сгорания и это говорит об эффективности их применения в качестве газомоторного топлива.

Система подачи природного газа для карьерного самосвала БелАЗ 75131 была рассчитана при замещении дизельного (нефтяного) топлива природным газом не более чем на 30 %.

При выполнении расчета параллельно определялся диаметр трубопровода после форсунок, который обеспечил бы в нем необходимую скорость движения парообразного (газообразного) газа.

Теплота сгорания природного газа: $Q_n^v = 34,15 \text{ МДж} / \text{м}^3$.

Плотность природного газа (при нормальных условиях):

$$\rho_{0sm} = \rho_{ch4} \cdot r_{ch4} + \rho_{c2h6} \cdot r_{c2h6} + \rho_{c3h8} \cdot r_{c3h8} = 0,73 \text{ кг/м}^3 \quad (3)$$

Плотность природного газа в трубопроводе (после форсунок) подающем природный газ в воздухозаборный канал двигателя:

$$\rho = \rho_{0sm} \frac{pT_0}{p_0T} = 0,73 \frac{0,1 \cdot 273}{0,1 \cdot 313} = 0,637 \text{ кг/м}^3 \quad (4)$$

Средняя скорость природного газа в трубопроводе диаметром $d = 0,016 \text{ м}$ после форсунок $w = 129 \text{ м/с}$, приведенная к рабочим условиям при температуре $+40^\circ\text{C}$ при скорости $w = 148 \text{ м/с}$. Такая высокая скорость может быть использована для сильно разреженных или перегретых газов (паров). Для газов при атмосферном давлении рекомендована скорость в каналах $12 \div 16 \text{ м/с}$, а для перегретых паров $30 \div 75 \text{ м/с}$. Принималось, что скорость природного газа не должна превышать 30 м/с . Объемный расход природного газа в рабочих условиях составляет $V = 0,0298 \text{ м}^3/\text{с}$.

Диаметр трубопровода после форсунок для обеспечения принятой рекомендованной скорости рассчитывался по приведенной ниже формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot w}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0298}{3,14 \cdot 30}} = 0,0355 \text{ м} \quad (5)$$

Результаты и обсуждения

В настоящее время известно множество способов и устройств для измерения и контроля потока газов. Расходомеры с сужающими устройствами нашли наиболее широкое применение в средствах измерения, в том числе и газообразных сред. Достоинствами таких расходомеров являются несложный конструктив и надежность. Недостатком является сложность при проведении измерений расходов пульсирующих сред.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема питания сжиженным природным газом двигателя Cummins KTA50 газодизельного карьерного самосвала БелАЗ 75131. Сжиженный природный газ с температурой $-115 \div 135^\circ\text{C}$ и давлением $1,0 \div 1,5 \text{ МПа}$ из криогенного топливного бака 1 поступает в испаритель (регазификатор) сжиженного природного газа 3, где осуществляется его перевод в газообразное (парообразное) состояние и подогрев до температуры $+38-42^\circ\text{C}$. Далее газообразный (парообразный) природный газ при давлении $0,45 \div 0,55 \text{ МПа}$ подается в форсунки 4 и после них поступает в воздухозаборные трубопроводы 5, где происходит образование топливно-воздушной смеси посредством смешивания газа с воздухом. Управляющий испаритель 2 предназначен для поддержания постоянного рабочего давления в криогенном топливном СПГ-баке. В управляющем испарителе 2 происходит испарение необходимого количества газа, которое при рабочем давлении в криогенном топливном СПГ-баке замещает вышедший из него объ-

ем сжиженного природного газа. Для того чтобы давление газа в танке не превышало допустимого, предусмотрен предохранительный клапан 8.

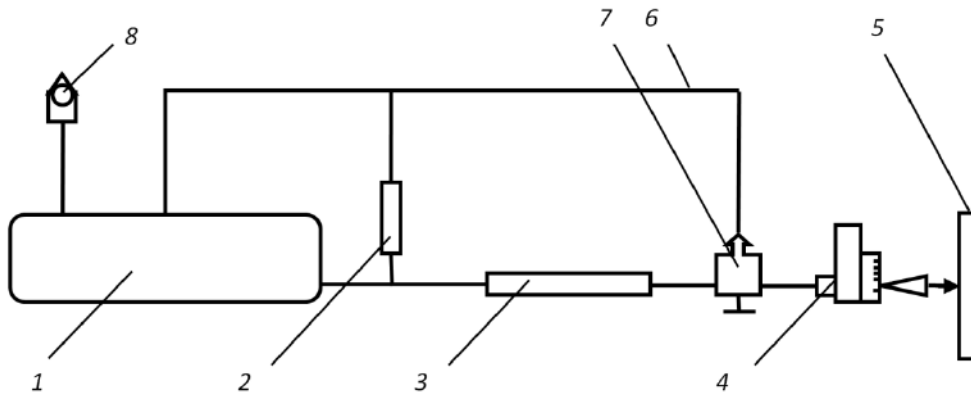


Рисунок 1 – Принципиальная схема системы питания двигателя сжиженным природным газом: 1 – криогенный топливный СПГ-бак; 2 – управляющий испаритель; 3 – испаритель (регазификатор); 4 – форсунки; 5 – воздухозаборный трубопровод; 6 – трубопровод (парообразного) газообразного природного газа; 7 – регулятор газовой фазы; 8 – предохранительный клапан

В процессе эксплуатации транспортного средства в газодизельном режиме необходимо определять расход природного газа подаваемого в камеры сгорания цилиндров двигателя. Мониторинг количественного расхода природного газа позволяет в последствии получить данные для расчёта K_z - коэффициента частичного замещения дизельного (нефтяного) топлива природным газом.

Для контроля количества потребляемого природного газа в процессе эксплуатации газодизельного карьерного самосвала БелАЗ 75131 был разработан измерительный комплекс (ИК). ИК состоит из двух газовых расходомеров, дифференциальных манометров, термопар, гасителя пульсаций газа, вычислительного (электронного) блока, а также соединительных трубопроводов. Работа расходомера основана на прохождении парообразного (газообразного) природного газа через диафрагму. Для качественного мониторинга расхода природного газа рассчитаны оптимальные размеры диафрагмы на необходимую производительность и перепады давления. В расходомерах устанавливаются термопары так как при изменении температуры парообразного (газообразного) природного газа необходимо осуществлять корректировку значений его плотности. Преобразованный в вычислительном (электронном) блоке сигнал, подаваемый с датчика дифференциального давления, в виде цифрового значения расхода природного газа (с учетом его температуры) отображается на экране монитора вычислительного (электронного) блока, устанавливаемого в кабине водителя карьерного самосвала. В процессе мониторинга выводится среднее значение расхода природного газа. Для фиксации расхода газа за определенный период работы двигателя (смена, сутки и т.д.), предусмотрен сумматор расхода. Для снижения влияния пульсаций газа на работу расходомеров после форсунок устанавливается гаситель пульсаций газа [16].

Схематично подача парообразного (газообразного) природного газа от реек форсунок в воздухозаборные каналы двигателя внутреннего сгорания Cummins KTA 50, а также места установки измерительного комплекса включающего гаситель пульсации газа, газовые расходомеры и дифференциальные манометры, представлена на рис.2 .

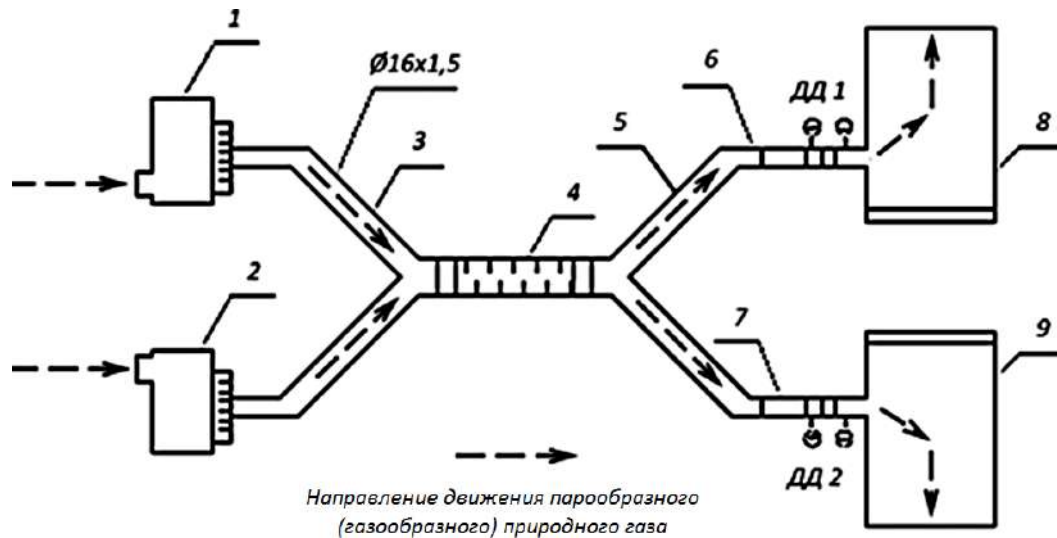


Рисунок 2 – Схема подачи парообразного (газообразного) природного газа от реек форсунок в воздухозаборные каналы двигателя Cummins KTA 50: 1,2 – рейки форсунок; 3,5 – тройники; 4 – гаситель пульсаций газа; 6,7 – газовые расходомеры; 8,9 – воздухозаборные каналы; ДД 1, ДД 2 – дифференциальные манометры.

При проведении тестовых испытаний ИК было выявлено, что парообразный (газообразный) природный газ подается равномерно в оба воздухозаборных канала, о чем свидетельствовали показания расходомеров. Перебоев и детонаций в работе двигателя не наблюдалось. Кроме того, было зафиксировано снижение перепада давления между правой и левой турбинами при работе в газодизельном режиме по сравнению с дизельным режимом работы. Полученные данные свидетельствуют о том, что применение в ИК гасителя пульсаций газа снизило негативное влияние пульсаций газа, как на работу расходомеров, так и на работу турбин двигателя.

Выводы

1. Использование ИК в криогенной бортовой топливной системе газодизельного карьерного самосвала БелАЗ 75131 позволило отслеживать в интерактивном режиме текущий расход парообразного (газообразного) природного газа, а также его суммарный расход за определенный отрезок времени (смена, сутки и т.д.). Обеспечить равномерность подачи газа на оба ряда цилиндров двигателя Cummins KTA 50, а также гарантировать устойчивость его работы и исключить детонацию двигателя при работе в газодизельном режиме.

2. Разработка инновационного измерительного комплекса (ИК) позволит проводить дальнейшие качественные исследования газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ, на предмет определения коэффициента частичного замещения дизельного топлива сжиженным природным газом - метан во взаимосвязи с горно-геологическими условиями на участках технологических трасс горных выработок.

Список литературы

1. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Chegoshev A.A., Ashikhmin V.E. Substantiation of the need to create an eccentric cycloidal gearing transmission of geokhod // IIIth International Innova-

- tive Mining Symposium: E3S Web Conferences. 41, 03008 (2018). – DOI: 10.1051/e3sconf/20184103008.
2. Goncharuk A.G., Havrysh V.I., Nitsenko V.S. National features for alternative motor fuels market // *International Journal of Energy Technology and Policy*. – 2018. – Vol. 14, № 2-3. – pp. 226-249.
3. Thiruvengadam A., Besch M., Carder D., Oshinuga A. Greenhouse gas and ammonia emissions from current technology heavy-duty vehicles // *Journal of the Air & Waste Management Association*. – 2016. Vol.66, № 11. – pp. 1045-1060. – DOI: 10.1080/10962247.2016.1158751
4. Carmichael D.G., Bartlett B.J., Kaboli A.S. Surface mining operations: coincident unit cost and emissions // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. – 2014. Vol.28, № 1. – pp. 47-65. – DOI: 10.1080/17480930.2013.772699.
5. Koptev V.Y., Kopteva A.V. Structure of energy consumption and improving open-pit dump truck efficiency // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2017. Vol. 87, № 2. – P. 022010. – DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022010.
6. Quiros D.C., Smith J., Thiruvengadam A., Huai T. Greenhouse gas emissions from heavy-duty natural gas, hybrid, and conventional diesel on-road trucks during freight transport // *Atmospheric Environment*. – 2017. Vol.168. – pp. 36-45. – DOI: org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.066.
7. Anisimov I.A., Ivanov A.S., Chikishev E.M. Assessment of adaptability of natural gas vehicles by the constructive analogy method // *International Journal of Sustainable Development and Planning*. – 2017. – Vol. 12, № 6. – pp. 1006–1017. – DOI: 10.2495/SDP-V12-N6-1006-1017.
8. Кузнецов И.В., Паначев И.А., Дубов Г.М., Нохрин С.А. Энергетическая оценка эксплуатации газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ-75131 на разрезах Кузбасса // «Справочник. Инженерный журнал». – Москва: «СПЕКТР». – 2019. – №4 (265). С. 19 - 23. – DOI: 10.14489/hb.2019.04. pp. 019-023.
9. Kuznetsov I.V., Panachev I.A., Dubov G.M., Nokhrin S.A. Energy Assessment of BelAZ-75131 Gas-diesel Mining Dump Trucks Operation at Kuzbass Open Casts // *Vth International Innovative Mining Symposium*. – Kemerovo, Russian Federation, October 19 - 21, 2020. – E3S Web of Conferences 174, 03010 (2020). – p.8. – DOI: 10.1051/e3sconf/202017403010.
10. Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации/ URL: <https://minenergo.gov.ru/node/13792> (дата обращения: 30.07.2021г.). Текст: электронный.
11. Хазин М.Л. Перевод карьерных самосвалов на газ в условиях севера // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2019. – Т.19, №1. – С. 56-72. – DOI: 10.15593/2224-9923/2019.1.5.
12. Osorio-Tejada J.L., Llera-Sastresa E., Scarpellini S. Liquefied natural gas: Could it be a reliable option for road freight transport in the EU? // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. Vol.71. – pp. 785-795. – DOI: org/10.1016/j.rser.2016.12.104.
13. Cheenkachorn K., Poompipatpong C., Ho C.G. Performance and emissions of a heavy-duty diesel engine fuelled with diesel and LNG (liquid natural gas) // *тEnergy*. – 2013. – Vol. 53. – pp. 52–57. – DOI: 10.1016/j.energy.2013.02.027.
14. Wahhab H.A.A., Ismael M.A., Aziz A., Heikal M.R. Research article modeling of a spray of diesel fuel with dissolved liquefied natural gas // *Asian Journal of Applied Sciences*. – 2017. – № 10 (2). – pp. 88–95. – DOI: 10.3923/ajaps.2017.88.95.

15. Богомолов А.Р., Азиханов С.С., Дубов Г.М., Григорьева Е.А., Нохрин С.А. Исследование состава выхлопных газов карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих в дизельном и газодизельном режимах // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – №2. – С. 30-41. – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-30-41.

16. Azikhanov S.S., Bogomolov A.R., Dubov G.M., Nohrin S.A. Development of the instrumentation system for gas-and-diesel fuelled BelAZ dump truck X International Scientific and Practical Conference // «INNOVATIONS IN MECHANICAL ENGINEERING» (ISPCIME 2019): MATEC Web of Conferences. 297, 03001 (2019). – DOI: 10.1051/matecconf/201929703001.

DEVELOPMENT OF THE INSTRUMENTATION SYSTEM FOR GAS-AND-DIESEL FUELLED BelAZ DUMP TRUCK

¹ **Dubov G.M.**, C. Sc. (Engineering), Associate Professor, e – mail: nikokem@mail.ru

^{1,2} **Bogomolov A.R.**, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, e – mail: barom@kuzstu.ru

^{1,2} **Azikhanov S.S.**, C. Sc. (Engineering), Associate Professor, e – mail: ass.pmahp@kuzstu.ru

³ **Nokhrin S.A.**, (Engineering), Deputy General Director for Gasification of Motor Transport, e – mail: nsa500@mail.ru

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Vesennyaya St., 28, Kemerovo, Russian Federation

²Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 630090, Academician Lavrentyev Prospect, 1, Novosibirsk, Russian Federation

³«TekhnoEco» LLC, 653046, Azovskaya St., 11, Prokopyevsk, Kemerovo region - Kuzbass, Russian Federation

Abstract

The prospects for the use of natural gas as a motor fuel are considered. The analysis of the operation of gas-diesel-fuelled BelAZ 75131 dump truck, which burns liquefied natural gas, is conducted. The schematic diagram for engine power supply with liquefied natural gas is given. The calculation of the liquefied natural gas supply system with the replacement of diesel fuel by 30% was made. The instrumentation system for controlling the amount of supplied natural gas is developed. The complex allows obtaining data on the instantaneous gas flow rate and the total flow rate over a period of time. A pulsation damper used as part of the system allowed reducing gas pulsation in fuel manifolds after injectors, to create conditions for the use of orifice plate flow meters, and ensured the uniform supply of natural gas to both banks of cylinders, which favourably affected the engine.

Keywords: BelAZ dump truck, motor fuel, liquefied natural gas, on-board cryogenic fuel system, instrumentation system.

УДК 622.684

**АНАЛИЗ КРИОГЕННЫХ БОРТОВЫХ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ
И ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ДВУХТОПЛИВНЫЙ
(ГАЗОДИЗЕЛЬНЫЙ) РЕЖИМ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ**

*ЕЛЬЦОВ Иван Евгеньевич¹, инженер-конструктор,
e-mail: t-pain99@yandex.ru*

*ЧЕГОШЕВ Алексей Александрович², старший преподаватель,
e-mail: chegoshevaa@kuzstu.ru*

*НОХРИН Сергей Алексеевич³, заместитель генерального директора,
по газификации автотранспорта, e-mail: nsa500@mail.ru*

¹ООО «Торгинвест», 650991, Россия, г. Кемерово, пр-т Советский, 25

²Кузбасский государственный технический университет им Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

³ООО «ТехноЭко», 653046, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Прокопьевск, ул.
Азовская, 11

Аннотация

Рассмотрены основные схемы существующих КБТС – (криогенных бортовых топливных систем), а также основные типы испарителей-регазификаторов сжиженного природного газа (СПГ). Приведённый анализ показал, что на сегодня существует ряд классических видов технологических схем КБТС, поэтому исследования, направленные на обоснование и выбор конструктивных и схемных решений по размещению и компоновке криогенных бортовых топливных систем именно на карьерной технике являются актуальными. Анализ также показал, что наиболее целесообразным типом испарителя-регазификатора, для использования в криогенных бортовых топливных системах карьерных самосвалов, является многоконтурный испаритель-регазификатор использующий тепловую энергию теплоносителя (охлаждающей жидкости) из системы охлаждения двигателя карьерного самосвала. Это, в свою очередь позволяет значительно упростить процесс регазификации СПГ при эксплуатации карьерного самосвала в газодизельном режиме.

Ключевые слова: БелАЗ, карьерный самосвал, газомоторное топливо, сжиженный природный газ, газодизельный режим работы, испаритель-регазификатор, теплоноситель.

Введение

Спрос на полезные ископаемые в мире растет год от года в связи с увеличением промышленного производства. Это, в свою очередь, создаст спрос на экономичное и экологически чистое горнодобывающее оборудование. Горнотранспортные комплексы являются ключевыми составляющими технологического горного оборудования, к которым в том числе относится карьерный транспорт. Транспортировка твердых минеральных ресурсов сопровождается достаточно высокими затратами, достигающими порой 50% от общих затрат на добычу полезных ископаемых. В то же время эффективность разработки месторождения полезных ископаемых напрямую зависит от используемого для транспортировки вскрышных пород и твердых минеральных ресурсов вида транспорта [1-4].

Для транспортировки твердых минеральных ресурсов ключевым автомобильным транспортом являются большегрузные карьерные самосвалы (КС) с дизельными двигателями внутреннего сгорания, которые потребляют миллиарды литров дизельного топлива, при этом происходит значительный выброс (с выхлопными газами) в атмосферу токсичных веществ (углекислого газа, серы и т.д.). Одним из способов снижения вредных выбросов, при транспортировке горной массы, является использование (экологически более чистого) газомоторного топлива [5-9].

Газомоторное топливо на сегодняшний день является альтернативой традиционному нефтяному (дизельному) моторному топливу. Природный газ - самый экономичный, экологичный и безопасный вид топлива. Энергоэффективность процесса транспортировки горной массы карьерными самосвалами, работающими в двухтопливном (газодизельном) режиме выше, чем для карьерных самосвалов, работающих только на дизельном топливе. При использовании СПГ – (сжиженного природного газа) в качестве газомоторного топлива может значительно снизиться загазованности промышленных площадок горнодобывающих карьеров, разрабатывающих месторождения полезных ископаемых открытым способом, а также снизиться содержание токсичных и канцерогенных веществ в отработавших газах и затраты на топливо; увеличиться ресурс работы двигателя; уменьшиться расход моторного масла и шум от работы двигателя [10-14].

Результаты и обсуждения

Использование СПГ - (сжиженного природного газа), в качестве газомоторного топлива на КС с дизельными двигателями внутреннего сгорания (ДВС) возможна, как посредством замещения их газовыми двигателями, так и посредством модернизации дизельных ДВС. Замена дизельных двигателей на газовые двигатели потребует создание новых двигателей, работающих только на газе. В случае частичной реконструкции дизельных двигателей они оснащаются криогенными бортовыми топливными системами. Поэтому наибольшее распространение получили именно дизельные двигатели, работающие в двухтопливном (газодизельном) режиме. В этом режиме двигатель работает как на дизтопливе, так и на смешанном газодизельном топливе, которое имеет более высокую температуру самовозгорания. В этом случае при включении двигателя подается небольшое количество дизтоплива, называемое «доза воспламенения», чтобы обеспечить дальнейшее возгорание газозооушной смеси. В этой связи, двухтопливный двигатель не может работать только на газе [7].

В настоящее время известны следующие технологические схемы КБТС: с криогенным насосом (рис. 1, а); с равновесным состоянием сжиженного природного газа при повышенном давлении (рис. 1, б); с управляющим испарителем (рис. 1, в).

При повышенном давлении подачи природного газа в ДВС используется технологическая схема, в которой присутствует – криогенный насос (рис. 1, а). Применение данного оборудования позволяет обеспечить давление газа (при его подаче) более 2,5 МПа. Данное значение давления создается посредством испарителя-регазификатора, включенного в технологическую схему КБТС. Также использование испарителя регазификатора исключает необходимость в использовании в технологической схеме управляющего испарителя.

Основным достоинством представленной технологической схемы является следующее. Криогенный топливный СПГ - бак заправляется СПГ под давлением, приближенном к атмосферному, что обуславливается невысоким содержанием CO_2 в СПГ.

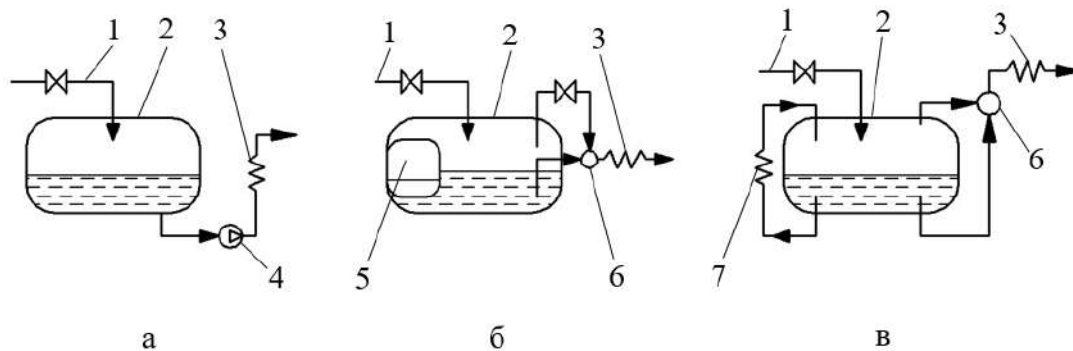


Рисунок 1 – Технологические схемы КБТС:

а – с криогенным насосом; б – с равновесным состоянием сжиженного газа при повышенном давлении; в – с управляющим испарителем (1 – линия подачи СПГ в криогенный бак; 2 – криогенный топливный СПГ – бак; 3 – испаритель-регазификатор; 4 – криогенный насос; 5 – дополнительное паровое пространство; 6 – переключатель фаз; 7 – управляющий испаритель)

Ключевыми недостатками представленной технологической схемы являются: усложненный запуск КБТС в эксплуатацию; необходимость обеспечения гарантированного однофазного состояния СПГ в криогенном насосе; высокая стоимость криогенного насоса.

При использовании технологической схемы с равновесным состоянием СПГ (при повышенном давлении) (рис. 1, б), природный газ попадает в ДВС проходя через испаритель-регазификатор посредством присутствующего необходимого давления в криогенном топливном СПГ – баке. Данное давление образуется при высокой температуре, когда он заполнен СПГ, находящимся в равновесном состоянии. В случае когда криогенный топливный СПГ – бак опустошается до минимума, давление в СПГ – баке понижается из-за увеличения парового пространства.

Из основных достоинств этой технологической схемы можно выделить следующие: как и в вышеописанной технологической схеме нет необходимости в дополнительном управляющем испарителе и в регулировке давления, что улучшает надежность данной схемы в связи с тем, что велика вероятность (в процессе эксплуатации) кристаллизация CO_2 и прочих примесей вследствие чего происходит загрязнение теплообменных элементов испарителя-регазификатора и запорного (криогенного) вентиля.

Из основных недостатков этой технологической схемы можно выделить следующие: необходимо наличие СПГ имеющего температуру приблизительно 140 К и давление не меньше 0,8 МПа; заправка криогенного топливного СПГ – бака осуществляется при высоком давлении в нем; сокращается срок хранения СПГ в криогенном топливном СПГ – баке (без сброса газа в атмосферу) что обусловлено высокой начальной температурой природного газа; возможный запас заправляемого СПГ в криогенный топливный СПГ – бак меньше приблизительно в среднем на 15 %, чем для технологической схемы имеющей в своем составе управляющий испаритель.

Третья технологическая схема – с управляющим испарителем (рис. 1, в). Данная схема предполагает наличие управляющего испарителя, увеличивающего давление в криогенном топливном СПГ – баке, что обеспечивает подачу природного парообразного (газообразного) газа в ДВС. Фазовый переключатель и газорегулятор давления применяются для регулирования давления. Под высоким давлением природный газ через них подается в испаритель-регазификатор, а затем в двигатель.

Данная схема имеет следующие преимущества: относительно простое оборудование для заправки; длительное бездренажное хранение СПГ (без сброса газа в атмосферу); наибольшее количество топлива по объему.

Из основных недостатков этой технологической схемы можно выделить следующие: снижается объем возможного использования природного газа в качестве газомоторного топлива в процессе эксплуатации ДВС; растворимость CO_2 в СПГ – метан не высока, возможна кристаллизация CO_2 сопровождающаяся засорением газовых трубопроводов и теплообменного элемента расположенного внутри управляющего испарителя; при без насосной схеме заправки (методом перекачки) пары СПГ – метан удаляются в окружающую среду; при перезаплатнении криогенного топливного СПГ – бака, сжиженный природный газ удаляется через свечу зажигания, при этом приводя к аварийной -пожароопасной ситуации. Эта схема, несмотря на недостатки, довольно распространена и внедряется многими компаниями.

Применение кассетных криогенных топливных СПГ – баков, является еще одним видом технологической схемы КБТС. Данное схемное решение основано на замене пустых кассетных криогенных топливных СПГ – баков, на предварительно заполненными (на станции сжижения природного газа) СПГ-метан кассетными криогенными топливными СПГ – баками. Основным достоинством представленной технологической схемы является следующее: отсутствует как таковой заправочный цикл, осуществляемый непосредственно на работающем технологическом оборудовании; нет необходимости в заправочной станции и мобильных топливных заправщиках. Основным недостатком этого решения можно считать то, что с увеличением количества кассетных криогенных топливных СПГ – баков уменьшается эффект от снижения стоимости при использовании газомоторного топлива СПГ-метан [15-17].

Сжиженные газы (природные, углеводородные и др.) при транспортировке и хранении находятся в жидком состоянии. Для использования газ необходимо регазифицировать, т.е. преобразовать из жидкого состояния в газообразное (парообразное). Для перегрева сжиженных газов на карьерных самосвалах используют теплообменные аппараты с искусственной регазификацией, поскольку для испарения применяется специальный энергоноситель, позволяющий ускорить процесс регазификации. Для различных видов энергоносителей необходимо использовать специальный теплообменник, позволяющий использовать тот или иной энергоноситель для процесса регазификации. Такие теплообменные аппараты различаются по своей конструкции, назначению и принципу работы. Одним из видов теплообменных аппаратов - испарители-регазификаторы, которые, как видно на рисунке 1 (поз. 3), являются одним из ключевых составляющих КБТС.

Типология испарителей-регазификаторов базируется на конструктиве и особенностях их теплообменных элементов, а также используемом для регазификации теплоносителе. Испарители-регазификаторы подразделяются на два вида – непрямого нагревания, а также прямого нагревания. В испарителях-регазификаторах прямого нагревания СПГ подогревается от теплоносителя непосредственно через стенку теплообменного элемента, в котором он находится. Теплообменные элементы бывают: трубчатые; змеевиковые; форсуночные; электрические; огневые; пленочные. В испарителях – регазификаторах непрямого нагревания СПГ подогревается через стенку промежуточным теплоносителем, подогреваемым основным теплоносителем. К ним относятся: огневой испаритель - регазификатор с водяной ванной, где промежуточным теплоносителем является азот или гелий, а также электрический испаритель - регазификатор, где промежуточным теплоносителем является азот [18,19].

Опыт показал, что для работы в составе КБТС на карьерных самосвалах по ряду критериев рациональнее использовать испаритель-регазификатор с прямым нагревом, позволяющий проводить перегрев СПГ без установки промежуточного теплоносителя.

Змеевиковые испарители-регазификаторы представляют собой цилиндрический корпус, внутри которого установлен змеевиковый теплообменник. Змеевиковые испарители-регазификаторы отличаются высокой паропроизводительностью за счет развитой поверхности змеевика. Не сложным конструктивным исполнением. Оснащаются авторегулированием и отсутствием сложной автоматики.

Из основных недостатков змеевиковых испарителей-регазификаторов можно выделить следующие: остановка процесса регазификации СПГ по причине отсутствия подачи теплоносителя либо при превышении расчетных значений испарительной способности; необходимость в специальном месте для рационального размещения испарителя-регазификатора; при небольших скоростях циркуляции теплоносителя возможно его замерзание в змеевике при низких температурах окружающей среды [18, 19, 20].

Трубчатые испарители-регазификаторы. Одним из видов таких испарителей-регазификаторов является трубчатый испаритель, состоящий из кожуха, внутри которого находятся трубы (теплообменные элементы) определенного диаметра. Основными достоинствами данного типа испарителей-регазификаторов являются: испарительная способность регулируется автоматически; обладают высоким коэффициентом разовой испарительной способности; обеспечивается подогрев паров СПГ, что снижает образование конденсата в газовых трубопроводах.

Основными недостатками являются: трудности в его изготовлении; сложности в обеспечении оптимальной и достаточной плотности межтрубного пространства; трудности при обслуживании в процессе его эксплуатации; при его размещении на открытом воздухе возникает потребность в тепловой изоляции; возможно замерзание теплоносителя в трубах (теплообменных элементах) [19].

Форсуночный испаритель-регазификатор, представляет собой теплообменник типа «труба в трубе». Отличаются простым конструктивом, хорошей ремонтпригодностью и обслуживанием. Эффективны при регулировании испарительной способности. Отличаются небольшой массой и габаритными размерами. Недостатки: процесс испарения сопровождается отсутствием естественной автоматизации; прекращение режима испарения в зимний период при низком давлении в баках, поэтому данный тип испарителей подходит только для подачи газа промышленным потребителям с равномерным отбором газа [18].

Электрические испарители-регазификаторы. Этот тип отличается тем, что для нагрева СПГ используются специальные электронагреватели. Преимуществами данного типа испарителей является отсутствие необходимости в автоматической защите трубопроводов от попадания жидкой фазы; значительное сокращение монтажных работ и уменьшение количества контрольно-измерительных и регулирующих приборов. Однако, нахождение нагревателя в большом объеме жидкой фазы не ликвидирует недостатков естественного испарения за счет тепла окружающей среды [19].

Пленочные испарители-регазификаторы. Преимуществами данного типа испарителей-регазификаторов являются: наличие небольшого количества СПГ в корпусе испарителя - регазификатора, что позволяет ему оперативно выходить на рабочие режимы; безопасность эксплуатации обусловленная отсутствием замерзшего конденсата на выходе; высокий коэффициент теплопередачи. Ключевым недостатком является его относительно большой габаритный размер - высота. По этой причине его применение ограничено использованием в специальных отапливаемых и вентилируемых помещениях [19].

Огневые испарители. Отличается тем, что, перегрев СПГ происходит из-за тепла, подводимого через пламенные или дымовые трубы. Данные испарители-регазификаторы отличаются независимостью от внешних источников энергии и небольшой удельной металлоем-

костью. Не требует размещения в специализированных помещениях. Недостатки: невысокий коэффициент единичной испарительной способности, недостаточная надежность по причине конденсации влаги на холодных поверхностях нагрева [18, 19, 21].

Выводы

1. Проведенный анализ показал, что на карьерных самосвалах частичное преобразование дизельных двигателей посредством установки криогенных бортовых топливных систем представляется на сегодня наиболее перспективным направлением развития газомоторной карьерной техники, чем разработка новых газовых двигателей, работающих только на газовом топливе.

2. На сегодня известен ряд классических видов технологических схем КБТС, поэтому исследования, направленные на обоснование и выбор конструктивных и схемных решений по размещению и компоновке криогенных бортовых топливных систем именно на карьерной технике во взаимосвязи с горнотехническими, эргономическими и экологическими требованиями, а также последующее изучение их эксплуатационных характеристик, являются актуальными.

3. На сегодня известен ряд различных испарителей-регазификаторов, отличающихся по своей конструкции, назначению и принципу работы. Но универсального типа и конструкции испарителя-регазификатора, наиболее подходящего для использования в составе КБТС карьерного самосвала, не существует.

4. Наиболее подходящей конструкцией испарителя-регазификатора для использования в составе КБТС карьерных самосвалов являются змеевиковые испарители. В таких испарителях возможно использование постоянно циркулирующего горячего теплоносителя из системы охлаждения ДВС карьерного самосвала без подключения дополнительных устройств, например, электронагревателя или запального устройства.

Список литературы

1. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Chegoshv A.A., Ashikhmin V.E. Substantiation of the need to create an eccentric cycloidal gearing transmission of geokhod // E3S Web Conferences. 41, 03008 (2018). – DOI: 10.1051/e3sconf/20184103008.

2. Дубов Г.М., Богомолов А.Р., Григорьева Е.А., Нохрин С.А. Анализ причин роста концентрации свинца в отработавшем масле ДВС КТА 50 карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих по газодизельному циклу // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 3. – С.84-93. – DOI: 10.26730/1999-4125-2021-3-84-93.

3. Кузнецов И.В., Паначев И.А., Дубов Г.М., Нохрин С.А. Энергетическая оценка эксплуатации газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ-75131 на разрезах Кузбасса // «Справочник. Инженерный журнал». – Москва: «СПЕКТР». – 2019. – №4 (265). С. 19 - 23. – DOI: 10.14489/hb.2019.04. pp. 019-023.

4. Kuznetsov I.V., Panachev I.A., Dubov G.M., Nokhrin S.A. Energy assessment of BelAZ-75131 gas-diesel mining dump trucks operation at Kuzbass open casts // E3S Web of Conferences. 174, 03010 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202017403010.

5. Богомолов А.Р., Азиханов С.С., Дубов Г.М., Григорьева Е.А., Нохрин С.А. Исследование состава выхлопных газов карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих в дизельном и газодизельном режимах // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – №2. – С. 30-41. – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-30-41.

6. Дубов Г.М., Богомолов А.Р., Азиханов С.С., Григорьева Е.А., Нохрин С.А. Исследование расходных и температурных характеристик карьерных самосвалов БелАЗ 75131, ра-

ботающих в газодизельном режиме // Горное оборудование и электромеханика. –2021. – №3. – С. 20-31. – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-20-31.

7. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Kuznetsov I.V., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Prospects for the use of liquefied natural gas as a motor fuel for haul trucks // E3S Web of Conferences 105, 03018 (2019). – DOI: 10.1051/e3sconf/201910503018.

8. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Nokhrin S.A. The use of alternative fuel for heavy-duty dump trucks as a way to reduce the anthropogenic impact on the environment // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 459, 042059 (2020). – DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042059.

9. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Kuznetsov I.V., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Procedure for haul truck on-board LNG fuel systems performance evaluation // E3S Web of Conferences. 105, 03019 (2019). – DOI:10.1051/e3sconf/201910503019.

10. Трухманов Д.С., Дубов Г.М., Чегошев А.А., Ельцов И.Е., Нохрин С.А. Методология оценки технико-экономических показателей криогенных бортовых топливных систем карьерных самосвалов БелАЗ, потребляющих в качестве моторного топлива СПГ // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – №3. – С. 32-38. – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-32-38.

11. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Development of technical requirements for on-board cryogenic fuel systems of BelAZ dump trucks // MATEC Web of Conferences. 297, 03002 (2019). – DOI: 10.1051/matecconf/201929703002.

12. Azikhanov S.S., Bogomolov A.R., Dubov G.M., Nohrin S.A. Development of the instrumentation system for gas-and-diesel fuelled BelAZ dump truck X International Scientific and Practical Conference // MATEC Web of Conferences. 297, 03001 (2019). – DOI: 10.1051/matecconf/201929703001.

13. Патент № 2701133. Российская Федерация, МПК В60К 15/07, F17С 13/08 (2006.01). Способ установки криогенных топливных баков на карьерном самосвале: № 2019103118; заявл. 04.02.19; опубл. 24.09.19, Бюл. №27 / Нохрин С.А., Дубов Г.М., Трухманов Д.С.; заявитель ООО "Сибирь-Энерго". – 14 с.: 7 ил.

14. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Method for installing cryogenic fuel tanks on the deck of BelAZ 7513 mining dump truck // E3S Web of Conferences. 174, 03016 (2020). – DOI: 10.1051/e3sconf/202017403016.

15. Попов О.М., Брагин А.В., Колгушкин Ю.В., Еремина Н.М., Мильман С.Б., Удуд В.Н. Системы хранения и подачи сжиженного природного газа, установленные на транспортные средства // «Использование природного газа на железнодорожном транспорте»: Материалы заседания секции «Распределение и использование газа» НТС ОАО «Газпром» (Екатеринбург, декабрь 2006). – Москва: ООО «ИРЦ «Газпром». – 2007. – С. 57.

16. Горбачев С.П., Попов В.П. Основные технические требования и результаты испытаний криогенных бортовых топливных систем для транспортных средств // «Современные технологии сжижения природного газа в установках малой и средней производительности. Использование природного газа на железнодорожном транспорте»: Материалы заседания секции «Распределение и использование газа» НТС ОАО «Газпром» (Екатеринбург, декабрь 2006 г.). – Москва: ООО «ИРЦ «Газпром». – 2007. – 152 с.

17. Горбачев С.П., Попов В.П., Шапкайц А.Д., Люгай М.В., Поденок С.Е. Результаты испытаний опытных образцов криогенных бортовых топливных систем для транспортных средств // Газовая промышленность. – 2008. – Спецвыпуск 626. – С. 17-20.

18. Стаскевич Н.Л., Северинец Г.Н., Вигдорчик Д.Я. Справочник по газоснабжению и использованию газа. – Ленинград: Недра. – 1990. – 762 с.

19. Преображенский, Н.И. Сжиженные углеводородные газы. – Ленинград: «Недра». – 1975. – 279 с.: ил.

20. Газовик Химмаш: сайт / ООО «Газ-Сервис». – Саратов, 2012. – URL: <https://propane-butane.ru>. (Дата обращения 12.07.2021).

21. Патент № 2594833. Российская Федерация, МПК F17C 9/02 (2006.01). Испаритель сжиженного углеводородного газа: № 2015138358/06; заявл. 08.09.15; опубл. 20.08.16, Бюл. №23 / Климов В.Ю. – 6 с.: ил.

ANALYSIS OF ON-BOARD CRYOGENIC FUEL SYSTEMS AND HEAT EXCHANGERS PROVIDING DUAL-FUEL (GAS-DIESEL) OPERATION OF MINING DUMP TRUCKS

¹Eltsov I.E., (Engineering), Design Engineer, e – mail: t-pain99@yandex.ru

²Chegoshev A.A., (Engineering), Senior Lecturer, e – mail: chegoshevaa@kuzstu.ru

³Nokhrin S.A., (Engineering), Deputy General Director for Gasification of Motor Transport, e – mail: nsa500@mail.ru

¹«Torginvest » LLC, 650991, Sovetskiy Ave., 25, Kemerovo, Russian Federation

²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Vesennyaya St., 28, Kemerovo, Russian Federation

³«TekhnoEco» LLC, 653046, Azovskaya St., 11, Prokopyevsk, Kemerovo region - Kuzbass, Russian Federation

Abstract

The main of the existing onboard cryogenic fuel system schematics, as well as the main types of liquefied natural gas evaporators, are considered. The analysis conducted suggests that at present there are a number of conventional types of onboard cryogenic fuel system schematics, therefore, studies aimed at substantiating and choosing design solutions and circuitries for the placement and layout of onboard cryogenic fuel systems on mining dump trucks are relevant. The analysis also showed that the most expedient type of evaporator to be used in onboard cryogenic fuel systems of mining dump trucks, is a multiple-circuit evaporator using the thermal energy of the heat transfer medium (coolant) from the engine cooling system of a mining dump truck.

Keywords: BelAZ, dump truck, gas engine fuel, liquefied natural gas, gas-diesel operation, evaporator, transfer medium.

УДК 622.684

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАЛУБЫ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА БелАЗ 75131
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ В ГАЗОДИЗЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ**

*НОХРИН Сергей Алексеевич¹, заместитель генерального директора,
по газификации автотранспорта, e-mail: nsa500@mail.ru*

*ЕЛЬЦОВ Иван Евгеньевич², инженер-конструктор,
e-mail: t-pain99@yandex.ru*

*ЧЕГОШЕВ Алексей Александрович³, старший преподаватель,
e-mail: chegoshevaa@kuzstu.ru*

¹ООО «ТехноЭко», 653046, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Прокопьевск,
ул. Азовская, 11

²ООО «Торгинвест», 650991, Россия, г. Кемерово, пр-т Советский, 25

³Кузбасский государственный технический университет им Т.Ф. Горбачева, 650000,
Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Аннотация

Рассматривается состояние вопроса об актуальности и эффективности технологии использования сжиженного природного газа, в качестве частичного замещения дизельного топлива на карьерных самосвалах. Говорится о том, что работы, направленные на обоснование и выбор конструктивных и схемных решений по размещению и компоновке криогенного оборудования на карьерной технике являются актуальными. Подробно описан новый способ реконструкции палубы карьерного самосвала БелАЗ 75131 (грузоподъёмностью 130 тонн). Приведены разработанные схемные и конструктивные решения по реконструкции палубы самосвала, позволяющие разместить дополнительное криогенное бортовое топливное оборудование на его борту. Утверждается, что разработанный новый способ реконструкции палубы позволил на практике реализовать масштабный проект по оснащению криогенными бортовыми топливными системами карьерных самосвалов БелАЗ 75131.

Ключевые слова: карьерный самосвал БелАЗ, моторное топливо, сжиженный природный газ, метан, криогенные бортовые топливные системы, газодизельный режим работы.

Введение

Ежегодно возрастает мировое потребление минеральных ресурсов, что ставит перед научным сообществом и бизнесом актуальные задачи по повышению эколого-экономической эффективности их добычи. Эффективность добычи минеральных ресурсов открытым способом, напрямую зависит от вида используемого технологического транспорта. На сегодняшний день основным видом технологического транспорта для перевозки горной массы являются тяжёлые карьерные самосвалы [1-4].

В настоящее время экономически целесообразным альтернативным топливом на автотранспортных средствах, признан природный газ, который можно использовать в качестве моторного топлива без какой-либо глубокой переработки, кроме стадии его добычи, транспортировки и сжижения [5].

Использование сжиженного природного газа, в качестве моторного топлива для горно - технологического оборудования, на сегодняшний день имеет большие перспективы. Сжи-

женный природный газ является топливом, которое значительно дешевле дизельного топлива. Технология использования сжиженного природного газа, в качестве частичного замещения дизельного топлива, не требует сложной и трудоёмкой конструктивной доработки двигателей внутреннего сгорания, что делает данную технологию экономически целесообразной для использования на карьерных самосвалах; снижает экологическую нагрузку на окружающую среду; повышает энергоэффективность процесса транспортировки горной массы [6-11].

В настоящее время разработанные методики оценки технико-экономических показателей криогенных бортовых топливных, позволяют качественно и количественно: определить коэффициент замещения» (K_3) дизельного топлива сжиженным природным газом, при эксплуатации карьерных самосвалов в газодизельном режиме; оценить экономическую эффективность эксплуатации карьерных самосвалов, оснащённых криогенными бортовыми топливными системами; определить фактический срок службы криогенных бортовых топливных систем и их наработку на отказ [12-13].

Реализация проектов по производству и потреблению сжиженного природного газа в России находится на начальном этапе своего становления и развития. Слабое присутствие в России собственных крупнотоннажных технологий сжижения природного газа, нормативно-технической и эксплуатационной документации на криогенное бортовое топливное оборудование, ставит российские проекты в зависимость от зарубежных поставщиков технологий, оборудования и сервисных услуг. Разработанные относительно недавно технические требования к криогенным бортовым топливным системам карьерных самосвалов БелАЗ, а также специализированное технологическое оборудование позволят дать дальнейший импульс к развитию и реализации отечественных проектов по производству и потреблению сжиженного природного газа применительно к технологическому карьерному транспорту [14-15].

В этой связи разработки, направленные на обоснование и выбор конструктивных и схемных решений по размещению и компоновке криогенного оборудования на карьерной технике во взаимосвязи с горнотехническими, эргономическими и экологическими требованиями, а также последующее изучение их эксплуатационных характеристик, являются актуальными.

Описание экспериментальных исследований

Разработка схемных и конструктивных решений по реконструкции палубы карьерных самосвалов БелАЗ-75131, для обеспечения их эксплуатации в газодизельном режиме, осуществлялась посредством программного комплекса системы трехмерного проектирования - КОМПАС-3D. Натурные исследования и анализ возможных вариантов размещения криогенного оборудования, на палубе карьерного самосвала БелАЗ 75131, производились непосредственно в автопарках горнодобывающих компаний Кузбасса, а также на заводе производителе карьерных самосвалов «БелАЗ». Проектирование схемных и конструктивных решений и реконструкция палубы карьерного самосвала осуществлялась группой компаний: ООО «Ресурс» (г. Новокузнецк, Россия); ООО «Сибирь-Энерго» (г. Новокузнецк, Россия); ООО «ТехноЭко» (г. Прокопьевск, Россия) при техническом и научном сопровождении ОАО "БЕЛАЗ" - управляющая компания холдинга "БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ" (г. Жодино, Республика Беларусь); ФГБОУ ВО КузГТУ (г. Кемерово, Россия). Стационарные исследования эксплуатационных показателей работоспособности криогенных

бортовых топливных систем (КБТС) проводились на специализированном испытательном стенде в условиях ООО «КАМСС» (г. Новокузнецк, Россия).

Результаты и обсуждения

Основной задачей при реконструкции палубы карьерного самосвала БелАЗ 75131 являлось эффективное и технологичное размещение криогенных топливных баков (КТБ) на его палубе, позволяющих обеспечить самосвал на одну рабочую смену необходимым запасом топлива - сжиженным природным газом (СПГ) – метан.

На рис. 1 - 6 представлены разработанные схемные и конструктивные решения по реконструкции палубы карьерного самосвала БелАЗ-75131. А именно на рис. 1 представлена общая схема размещения стандартного и нового криогенного оборудования на палубе самосвала; на рис. 2 представлена схема усиления его палубы; на рис. 3 представлен вариант размещения технологических ворот на переднем поручне палубы и место установки на палубе баллонов воздушных систем пневмопуска двигателя; на рис. 4 представлен вариант размещения технологических ворот на левом поручне палубы и место установки на палубе баллонов воздушных систем пневмопуска двигателя; на рис. 5 представлена схема монтажа модернизированного трапа на карьерном самосвале серии и на рис. 6 представлена схема монтажа защитного козырька над рамой, с закреплёнными в ней криогенными топливными баками (КТБ).

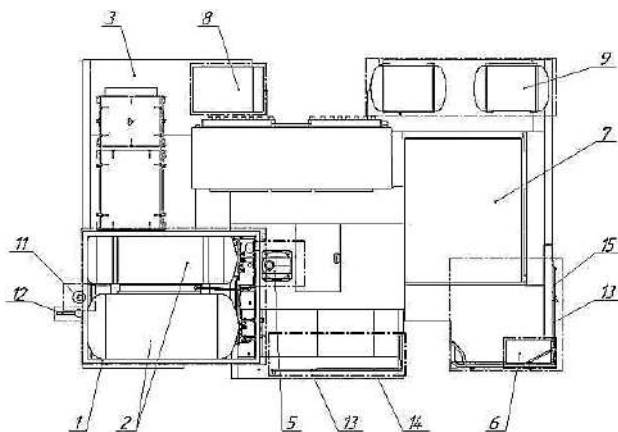


Рисунок 1 – Общая схема размещения оборудования на палубе карьерного самосвала БелАЗ 75131

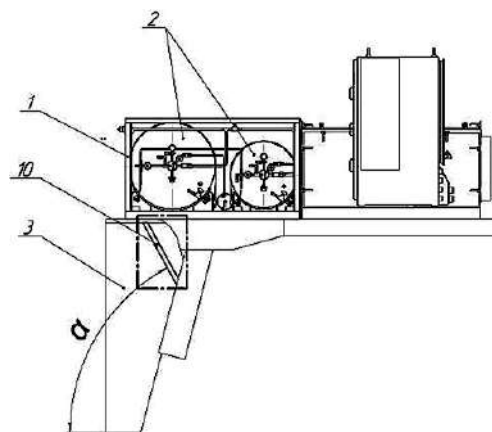


Рисунок 2 – Схема усиления палубы карьерного самосвала БелАЗ 75131

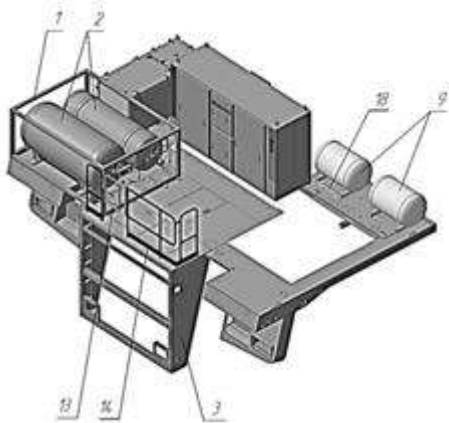


Рисунок 3 – Размещение технологических ворот на переднем поручне палубы карьерного самосвала БелАЗ 75131

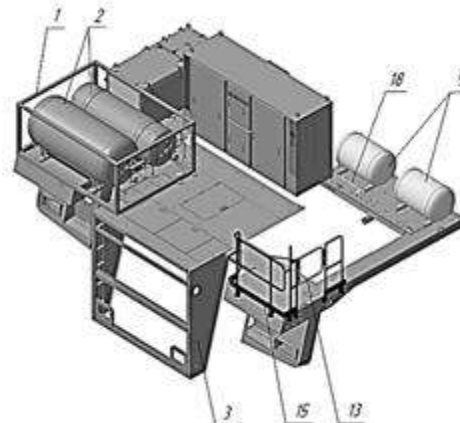


Рисунок 4 – Размещение технологических ворот на левом поручне палубы карьерного самосвала БелАЗ 75131

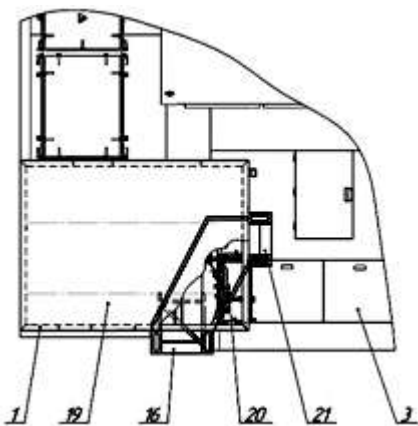


Рисунок 5 – Схема монтажа модернизированного трапа на карьерном самосвале БелАЗ 75131

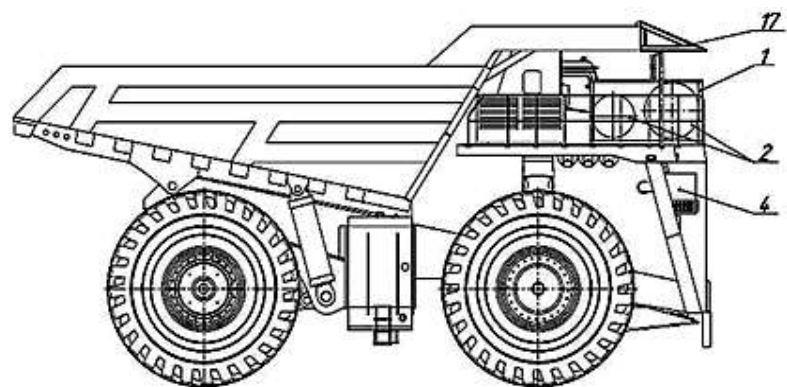


Рисунок 6 – Схема монтажа на карьерном самосвале БелАЗ 75131 защитного козырька над рамой, с закреплёнными в ней КТБ

Реконструкция палубы заключалась в том, что для размещения рамы 1 (рис. 1), с закреплёнными в ней КТБ 2, на палубе 3 (рис. 6) самосвала 4 (рис. 6) сначала производят перенос расширительного бачка 5 системы охлаждения по направлению к кабине водителя, на расстояние, позволяющее разместить раму 1 с КТБ и фиксируют его в данном положении (рис. 1). Стандартный ящик с инструментами 6 переносят в левый угол передней части палубы 3, перед кабиной водителя 7 и фиксируют его в данном положении (например сваркой) (рис. 1). Далее удаляют крюк (не показан) для транспортировки палубы 3, расположенный в месте изначальной установки ящика с инструментами 6 и в освободившееся место устанавливают ящик аккумуляторных батарей 8 (рис. 1). В место, откуда был перенесен ящик аккумуляторных батарей 8, монтируют баллоны 9 (рис. 1,3,4) системы пневмостартерного пуска двигателя, изначально располагавшиеся в передней части палубы 3. Каждый баллон 9 закрепляют на раме 18 (пропорционально разделенная стандартная заводская рама) (рис. 3,4). Каждую раму 18, с установленным на ней баллоном 9, закрепляют на палубе 3, например, по-

средством комплектов стандартных крепежных изделий. Палубу 3 усиливают ребрами жесткости 10 (рис. 2). Для этого используют два ребра жесткости 10, представляющие собой стальные трубы, которые закрепляют (например, сваркой) снизу палубы 3 под углом $\alpha = 60^\circ$, согласно схеме усиления палубы карьерного самосвала (рис. 2). После этого, на палубе 3, в передней правой её части, на место, где изначально были установлены баллоны 9, монтируют раму 1 с КТБ 2, которую закрепляют к палубе 3 (например, при помощи комплекта стандартного крепежа; длину крепежа подбирают таким образом, чтобы при наличии усиления палубы он проходил сквозь него) (рис. 1,2,3,4). Трубопровод сброса газа 11 из КТБ 2 устанавливают на раму 1 с КТБ 2 с внешней стороны палубы 3, для этого силиконовые отводящие патрубки (на рисунке не показаны), установленные на выпускных кранах КТБ 2, через тройник соединяют в общий патрубок (на рисунке не показан), который закрепляют к раме 1 с КТБ 2. К выходному концу патрубка присоединяют металлическую трубу трубопровода сброса газа 11, которую фиксируют к поручням палубы 3. (рис. 1). Рама 1 с КТБ 2, установленная на палубу 3, из-за своих габаритных размеров может частично перекрывать правое зеркало заднего вида. Поэтому, для обеспечения обзора из кабины водителя 7 при эксплуатации карьерного самосвала 4, производят модернизацию штатной стойки правого зеркала, заменяя её на стойку с увеличенной на 300-400 мм длиной. Модернизированную стойку с зеркалами 12 устанавливают в предусмотренное заводом изготовителем место и фиксируют стандартным крепежом (рис. 1). Для обеспечения беспрепятственного доступа к раме 1 с КТБ 2 в процессе его заправки сжиженным природным газом, устанавливают дополнительную запирающую технологическую дверку 13, в зависимости от технологической необходимости, на переднем 14 или левом 15 поручне, или одновременно на обоих поручнях палубы 3 (рис. 3,4). Для этого, в стандартных переднем 14 или левом 15 поручнях делают вырезы шириной 500 мм, а из вырезанных частей изготавливают дверки 13, которые на приварные металлические петли (на рисунке не показаны) закрепляют на одной из оставшихся половин поручней 14, 15 и в закрытом положении фиксируют на другой половине поручней 14 и 15 при помощи щеколды или другого запорного устройства (на рисунке не показаны). Так как рама 1 с КТБ 2, перекрывает правый стандартный трап самосвала 4, что затрудняет подъем на палубу 3 и спуск с неё по трапу (на рисунке не показан) с этой стороны, то производят монтаж модернизированного трапа 16, который получают путем изменения конструкции стандартного трапа (рис. 5). Для этого крепление верхней части трапа удлиняют и закрепляют (например, сваркой) на раме самосвала 4 под прямым углом к горизонту. Ступеньки трапа разворачивают так, чтобы при установке трапа на самосвал 4 они были параллельны горизонту и фиксируют такое их положение на трапе (например, сваркой). Для безопасности, раму 1 с КТБ 2 сверху накрывают металлическим листом 19, поверх которого устанавливают дополнительные поручни 20 и трап для спуска на палубу 21 (рис. 5). Для дополнительной защиты КТБ 2, от внешнего воздействия при загрузке и транспортировке перевозимого груза, а также минимизации попадания атмосферных осадков на КТБ 2, на правой части торца кузова самосвала 4, непосредственно над рамой 1 с КТБ 2, устанавливают защитный козырек 17 (рис. 6). Защитный козырек 17 представляет собой рамную металлоконструкцию из уголков, сваренную с уклоном в одну сторону, для отвода осадков и других нежелательных материалов, и веществ. На внешнюю поверхность рамы козырька наваривают металлический лист (позиция не показана) толщиной 10 мм или более. Защитный козырек 17 закрепляют сваркой на правой части кузова (рис. 6) [16-17].

Как было сказано выше, КТБ устанавливают в рамную металлоконструкцию, которую монтируют на палубе карьерного самосвала. Такое расположение упрощает монтаж КТБ и сокращает количество подготовительных мероприятий, а также увеличивает доступность

КТБ для заправки и обслуживания. Возможность вести прямое наблюдение за КТБ с места водителя, повышает безопасность при эксплуатации карьерного самосвала в газодизельном режиме работы и позволяет оперативно реагировать в случае возникновения чрезвычайной ситуации. Благодаря тому, что КТБ устанавливаются непосредственно на палубе, появляются возможности увеличения ёмкости устанавливаемых КТБ, а также установки нескольких КТБ, что позволяет повысить производительность процесса транспортировки горной массы, за счет уменьшения количества циклов заправки в рабочую смену.

Положительный результат внедрения предлагаемого способа реконструкции подтверждается реализованным на практике проектом по оснащению криогенными бортовыми топливными системами карьерных самосвалов БелАЗ 75131. В настоящее время реконструированы для работы по газодизельному циклу и успешно эксплуатируются на разрезах Кузбасса 68 карьерных самосвалов БелАЗ 75131 (рис. 7).



Рисунок 7 – Два горизонтальных криогенных топливных бака объёмом: 850 и 500 литров, установленные на палубе карьерного самосвала БелАЗ 75131

Выводы

Разработанный способ реконструкции палубы карьерного самосвала БелАЗ 75131 позволил решить ряд ключевых задач, а именно: обеспечить эксплуатацию самосвала в двухтопливном (газодизельном) режиме с использованием в качестве моторного топлива сжиженного природного газа – метан; упростить процесс монтажа КТБ на палубе самосвала; повысить безопасность при эксплуатации самосвала в газодизельном режиме; увеличить объём устанавливаемых КТБ на палубе самосвала; повысить производительности процесса транспортировки горной массы, за счет уменьшения количества циклов заправки в одну рабочую смену; упростить процесс заправки и обслуживания КТБ установленных на палубе.

Список литературы

1. Хазин М.Л. Перевод карьерных самосвалов на газ в условиях севера // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т.19, №1. – С. 56-72. – DOI: 10.15593/2224-9923/2019.1.5.
2. Дубинкин Д.М., Садовец В.Ю., Сыркин И.С., Чичерин И.В. Разработка структуры системы управления беспилотным карьерным самосвалом // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 6(152). – С. 25-30. – DOI 10.26730/1816-4528-2020-6-25-30.

3. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Chegoshhev A.A., Ashikhmin V.E. Substantiation of the need to create an eccentric cycloidal gearing transmission of geokhod // E3S Web Conferences. 41, 03008 (2018). – DOI: 10.1051/e3sconf/20184103008.
4. Дубов Г.М., Богомолов А.Р., Григорьева Е.А., Нохрин С.А. Анализ причин роста концентрации свинца в отработавшем масле ДВС КТА 50 карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих по газодизельному циклу // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 3. – С.84-93. – DOI: 10.26730/1999-4125-2021-3-84-93.
5. Хазин М.Л., Тарасов А.П. Эколого-экономическая оценка карьерных троллейбусов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т17, №2. – С. 166-180. – DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.6.
6. Кузнецов И.В., Паначев И.А., Дубов Г.М., Нохрин С.А. Энергетическая оценка эксплуатации газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ-75131 на разрезах Кузбасса // «Справочник. Инженерный журнал». – Москва: «СПЕКТР». – 2019. – №4 (265). С. 19 - 23. – DOI: 10.14489/hb.2019.04. pp. 019-023.
7. Kuznetsov I.V., Panachev I.A., Dubov G.M., Nokhrin S.A. Energy assessment of BelAZ-75131 gas-diesel mining dump trucks operation at Kuzbass open casts // E3S Web of Conferences. 174, 03010 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202017403010.
8. Богомолов А.Р., Азиханов С.С., Дубов Г.М., Григорьева Е.А., Нохрин С.А. Исследование состава выхлопных газов карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих в дизельном и газодизельном режимах // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – №2. – С. 30-41. – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-30-41.
9. Дубов Г.М., Богомолов А.Р., Азиханов С.С., Григорьева Е.А., Нохрин С.А. Исследование расходных и температурных характеристик карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих в газодизельном режиме // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – №3. – С. 20-31. – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-20-31.
10. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Kuznetsov I.V., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Prospects for the use of liquefied natural gas as a motor fuel for haul trucks // E3S Web of Conferences 105, 03018 (2019). – DOI: 10.1051/e3sconf/201910503018.
11. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Nokhrin S.A. The use of alternative fuel for heavy-duty dump trucks as a way to reduce the anthropogenic impact on the environment // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 459, 042059 (2020). – DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042059.
12. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Kuznetsov I.V., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Procedure for haul truck on-board LNG fuel systems performance evaluation // E3S Web of Conferences. 105, 03019 (2019). – DOI: 10.1051/e3sconf/201910503019.
13. Трухманов Д.С., Дубов Г.М., Чегошев А.А., Ельцов И.Е., Нохрин С.А. Методология оценки технико-экономических показателей криогенных бортовых топливных систем карьерных самосвалов БелАЗ, потребляющих в качестве моторного топлива СПГ // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – №3. – С. 32-38. – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-32-38.
14. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Development of technical requirements for on-board cryogenic fuel systems of BelAZ dump trucks // MATEC Web of Conferences. 297, 03002 (2019). – DOI: 10.1051/matecconf/201929703002.
15. Azikhanov S.S., Bogomolov A.R., Dubov G.M., Nohrin S.A. Development of the instrumentation system for gas-and-diesel fuelled BelAZ dump truck X International Scientific and

Practical Conference // MATEC Web of Conferences. 297, 03001 (2019). – DOI: 10.1051/mateconf/201929703001.

16. Патент № 2701133, Российская Федерация, МПК В60К 15/07, F17С 13/08 (2006.01). Способ установки криогенных топливных баков на карьерном самосвале: № 2019103118; заявл. 04.02.19; опубл. 24.09.19, Бюл. №27 / Нохрин С.А., Дубов Г.М., Трухманов Д.С.; заявитель ООО "Сибирь-Энерго". – 14 с.: 7 ил.

17. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Method for installing cryogenic fuel tanks on the deck of BelAZ 7513 mining dump truck // E3S Web of Conferences. 174, 03016 (2020). – DOI: 10.1051/e3sconf/202017403016.

RECONSTRUCTION OF THE BelAZ 75131 DUMP TRUCK DECK TO PROVIDE ITS GAS-DIESEL OPERATION

¹**Nokhrin S.A.**, (Engineering), Deputy General Director for Gasification of Motor Transport, e – mail: nsa500@mail.ru

²**Eltsov I.E.**, (Engineering), Design Engineer, e – mail: t-pain99@yandex.ru

³**Chegoshev A.A.**, (Engineering), Senior Lecturer, e – mail: chegoshevaa@kuzstu.ru

¹«TekhnoEco» LLC, 653046, Azovskaya St., 11, Prokopyevsk, Kemerovo region - Kuzbass, Russian Federation

²«Torginvest » LLC, 650991, Sovetskiy Ave., 25, Kemerovo, Russian Federation

³T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Vesennyaya St., 28, Kemerovo, Russian Federation

Abstract

The issue of the relevance and efficiency of the technology of using liquefied natural gas as a partial replacement for diesel fuel for mining dump trucks is considered. It is said that the work aimed at substantiating and choosing design solutions and circuitries for the placement and configuration of cryogenic equipment on dump trucks is relevant. A new method of reconstruction of the BelAZ 75131 dump truck (with a carrying capacity of 130 tons) deck is described in detail. The developed circuitries and design solutions for the reconstruction of the dump truck deck, which make it possible to place onboard additional cryogenic fuel equipment, are presented. It is argued that the developed new method of deck reconstruction made it possible in practice to implement a large-scale project to equip BelAZ 75131 dump trucks with on-board cryogenic fuel systems.

Keywords: BelAZ dump truck, motor fuel, liquefied natural gas, methane, on-board cryogenic fuel systems, gas-diesel operation.

УДК 622.684

СЖИЖЕННЫЙ ПРИРОДНЫЙ ГАЗ, КАК АЛЬТЕРНАТИВА ДИЗЕЛЬНОМУ (НЕФТЯНОМУ) ТОПЛИВУ ДЛЯ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ БелАЗ

*ЧЕГОШЕВ Алексей Александрович*¹, старший преподаватель,
e-mail: chegoshevaa@kuzstu.ru

*НОХРИН Сергей Алексеевич*², заместитель генерального директора,
по газификации автотранспорта,
e-mail: nsa500@mail.ru

*ЕЛЬЦОВ Иван Евгеньевич*³, инженер-конструктор,
e-mail: t-pain99@yandex.ru

¹Кузбасский государственный технический университет им Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

²ООО «ТехноЭко», 653046, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Прокопьевск, ул.
Азовская, 11

³ООО «Торгинвест», 650991, Россия, г. Кемерово, пр-т Советский, 25

Аннотация

Проводится краткий анализ экономических и экологических преимуществ при применении сжиженного природного газа - СПГ в качестве газомоторного топлива. Отмечается, что в сегменте тяжелого карьерного транспорта, сжиженный природный газ представляется наиболее перспективной альтернативой нефтяным видам моторного топлива. Утверждается, что в России, в Кузбассе впервые успешно реализован комплексный проект по производству СПГ и его потреблению применительно к тяжёлым карьерным самосвалам БелАЗ. Приводятся данные по оценке энергетической эффективности процесса перевозки вскрышных пород и твердых минеральных ресурсов тяжелыми газодизельными карьерными самосвалами серии БелАЗ 75131. Приведённые данные говорят о том, что энергетическая эффективность процесса перевозки вскрышных пород и твердых минеральных ресурсов карьерными самосвалами, работающими по газодизельному циклу выше, чем для самосвалов работающих только на дизельном топливе.

Ключевые слова: карьерный самосвал БелАЗ, криогенные бортовые топливные системы, моторное топливо, сжиженный природный газ, газодизельный режим работы.

Введение

Мировое потребление твердых минеральных ресурсов ежегодно возрастает на 0,6 - 1,5%. В стратегической программе развития угледобывающей отрасли Российской Федерации предполагается увеличение к 2030 году объемов добычи угля до 500 000 000 тонн в год. Добычу данных объемов можно достичь благодаря освоению месторождений Сибири и Дальнего Востока. Это сформирует существенную необходимость в новой карьерной технике с повышенными эколого-экономическими эксплуатационными характеристиками [1].

При проведении открытых горных работ в составе затрат по добыче и переработке твердых минеральных ресурсов ключевыми являются затраты на карьерный транспорт. Доля транспортных расходов, в себестоимости добычи твердых минеральных ресурсов, может достигать 50%.

Разработка месторождения твердых минеральных ресурсов и её эффективность напрямую взаимосвязаны с технологическим транспортом, используемым для транспортировки горной массы. На практике выбор технологического (карьерного) транспорта обусловлен геологическими условиями месторождений твердых минеральных ресурсов. Для открытых горных работ базовым технологическим транспортом остается автомобильный – карьерные самосвалы [2].

ОАО «БЕЛАЗ» - управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» поставляет на сегодняшний день в Кузбасс большое количество тяжёлых карьерных самосвалов. На разрезах области работают более трёх тысяч самосвалов БелАЗ, что составляет большую часть всего парка тяжёлых карьерных самосвалов в регионе.

Применение СПГ, как альтернативы дизельному (нефтяному) топливу на базовом технологическом оборудовании – карьерных самосвалах, рационально с учетом следующих обстоятельств:

- тяжелые карьерные самосвалы в процессе перевозки вскрышных пород и твердых минеральных ресурсов потребляют гигантские объёмы дизельного (нефтяного) топлива, что в конечном итоге сказывается не себестоимости одной тонны добытого полезного ископаемого;

- как правило перевозка вскрышных пород и твердых минеральных ресурсов на карьерах и разрезах производится по технологическим трассам, имеющим сложные горно-геологические условия, где происходит максимальная нагрузка на силовой агрегат - двигатель карьерного самосвала, что в свою очередь сопровождается максимальными выбросами с выхлопными газами вредных (токсичных) веществ при значительном расходе дизельного (нефтяного) топлива [2].

Описание экспериментальных исследований

Универсальным показателем эффективности эксплуатации карьерных самосвалов является энергетическая эффективность процесса перевозки вскрышных пород и твердых минеральных ресурсов. Для мониторинга энергетической эффективности процесса перевозки за единицу измерения энергоёмкости были приняты затраты (удельные) энергии (ЗЭ). Принимая во внимание то, что газодизельные самосвалы БелАЗ 75131 эксплуатируются как в двухтопливном (газодизельном) режиме, так и только в дизельном режиме, ЗЭ рассчитывались следующим образом [3-5]:

$$P_{\phi} = R (P_{\phi}^{Д.Г} + P_{\phi}^{П.Г}), \quad (1)$$

где, $P_{\phi}^{Д.Г}$ – затраты (удельные) энергии при перевозке 1 тонны вскрышных пород и твердых минеральных ресурсов на 1 метр на дизельном (нефтяном) топливе; $P_{\phi}^{П.Г}$ – затраты (удельные) энергии при перевозке 1 тонны вскрышных пород и твердых минеральных ресурсов на 1 метр на природном газе; R – коэффициент отражающий соотношения расстояний, которые карьерный самосвал проехал в газодизельном и дизельном режимах.

В свою очередь затраты (удельные) энергии для только дизельного цикла эксплуатации рассчитывались по ниже приведенной формуле:

$$P_{\phi}^{Д.Г} = \frac{g}{i} k_{пер} k_d k_{УГ}, \quad (2)$$

где, g – расход (удельный) дизельного (нефтяного) топлива, г/т·м; i – уклон трассы, ‰; $k_{пер}$ – коэффициент переработки, отражающий энергетические

затраты на производство дизтоплива ($k_{\text{пер}} = 1,18 \div 1,20$); $k_{\text{д}}$ – коэффициент, отражающий энергетические затраты на добычу и перевозку дизельного (нефтяного) топлива ($k_{\text{д}} = 1,04 \div 1,10$); $k_{\text{ут}}$ – коэффициент, отражающий разницу теплоты сгорания (удельной) дизельного и условного топлива ($k_{\text{ут}} = 1,5$).

Расход (удельный) дизельного (нефтяного) топлива определялся по формуле:

$$g = \frac{Q}{ml}, \quad (3)$$

где, Q – расход дизельного (нефтяного) топлива, г; m – масса транспортируемых вскрышных пород и твердых минеральных ресурсов, т; l – расстояние перевозки, м.

При эксплуатации в газодизельном режиме карьерного самосвала, затраты (удельные) энергии определялись, как:

$$P_{\text{ф}}^{\text{ПГ}} = \frac{g'}{l} k'_{\text{пер}} k'_{\text{д}} k'_{\text{ут}}, \quad (4)$$

где, g' – расход (удельный) природного газа, г/т·м; $k'_{\text{пер}}$ – коэффициент переработки, отражающий энергетические затраты на производство сжиженного природного газа - СПГ ($k'_{\text{пер}} = 1,2 \div 1,4$); $k'_{\text{д}}$ – коэффициент, отражающий энергетические затраты на добычу природного газа и перевозку сжиженного природного газа ($k'_{\text{д}} = 1 \div 1,3$); $k'_{\text{ут}}$ – коэффициент, отражающий разницу теплоты сгорания (удельной) газового и условного топлива ($k'_{\text{ут}} = 1,2$).

Расход (удельный) природного газа рассчитывался по приведенной выше формуле (3).

Подставив известные коэффициенты в формулу (1) получим общие затраты (удельные) энергии:

$$P_{\text{ф}} = R \left(\frac{Q}{iml} \times 1,2 \times 1,1 \times 1,5 + \frac{Q'}{iml} \times 1,4 \times 1,3 \times 1,2 \right); P_{\text{ф}} = \frac{1,98R}{iml} (Q + 1,1Q'), \quad (5)$$

Данное выражение (5) получено при условии, что расстояние перевозки при эксплуатации в газодизельном режиме и дизельном режиме будут примерно идентичными, что практически невозможно выполнить в производственных условиях. В связи с этим затраты (удельные) энергии карьерных самосвалов работающих в газодизельном режиме определялись по следующему выражению:

$$P_{\text{ф}} = \frac{1,98R}{im} \left(\frac{Q}{l} + \frac{1,1Q'}{l'} \right), \quad (6)$$

где, l – расстояние, которое прошел самосвал в дизельном режиме эксплуатации;
 l' – расстояние, которое прошел самосвал в газодизельном режиме эксплуатации.

Результаты и обсуждения

Как отмечалось выше, при открытых горных работах одним из путей повышения эколого-экономической эффективности эксплуатации карьерных самосвалов является использование других видов моторного топлива. Наиболее перспективным альтернативным моторным топливом признан природный газ, при этом природный газ используется без какой-либо глубокой переработки. [6-10].

Природный газ имеет ряд существенных преимуществ перед дизельным (нефтяным) топливом: цена природного газа ниже дизельного (нефтяного) моторного топлива; модернизация технологического транспорта – карьерных самосвалов для замещения дизельного (нефтяного) топлива сжиженным природным газом - СПГ сопровождается не существенной доработкой двигателя внутреннего сгорания карьерного самосвала; мощность дизельного двигателя не снижается; эксплуатация транспорта в газодизельном режиме, по отношению к дизельному режиму, сопровождается более устойчивыми и постоянными температурами по каждому ряду цилиндров двигателя; в выхлопных газах снижается количество вредных выбросов диоксида углерода (углекислого газа) (CO_2) и повышается содержание кислорода (O_2); уменьшаются транспортные расходы; снижается шум двигателя; с точки зрения безопасности метан самый неопасный из всех видов газомоторного топлива. Например, температура самовозгорания дизельного (нефтяного) топлива составляет $300 - 320$ °С, пропана 450 °С, а метана 540 °С [11-15].

На сегодняшний день в России первый комплексный проект, применительно к угледобывающей отрасли, по производству СПГ и модернизации технологического оборудования - карьерных самосвалов БелАЗ, для их последующей эксплуатации в двухтопливном (газодизельном) режиме, успешно реализовала Кузбасская группа предприятий: общества с ограниченной ответственностью «Ресурс» и «Сибирь-Энерго» (г. Новокузнецк), «Техно-Эко» (г. Прокопьевск) при технической поддержке ООО «КАМСС» (г. Новокузнецк).

Усилиями группы предприятий введен в эксплуатацию завод по производству сжижению природного газа - СПГ (рис. 1). Запущена в работу структура осуществляющая заправку карьерных самосвалов (включающая, в том числе заправочные площадки на участках горных работ) (рис. 2). При участии учёных ФГБОУ ВО КузГТУ, разработан инновационный проект по модернизации карьерных самосвалов БелАЗ 75131 для их последующей эксплуатации, как в дизельном, так и в газодизельном режимах. Проект получил согласование и был утвержден на ОАО «БЕЛАЗ». По состоянию на июль 2021 года модернизированы для работы по газодизельному циклу и эффективно работают на разрезах Кузбасса 68 БелАЗов модели 75131 (рис. 3) [16].



Рисунок 1 – Завод по сжижению природного газа (ООО «Сибирь-Энерго»)



Рисунок 2 – Стационарная площадка для заправки карьерных самосвалов сжиженным природным газом



Рисунок 3 – Модернизированные для эксплуатации по газодизельному циклу карьерные самосвалы БелАЗ 75131

Оценка удельных затрат энергии (энергетической эффективности) процесса перевозки вскрышных пород и твердых минеральных ресурсов газодизельными карьерными самосвалами БелАЗ 75131.

С помощью статистических методов осуществлена обработка данных полученных в процессе эксплуатации в реальных производственных условиях газодизельных карьерных самосвалов модели БелАЗ-75131. Полученные результаты обработки данных представлено в ниже приведенной таблице.

№	Расстояние, км	Вес груза, т	Уклон (средневзвешенный) технологической трассы, ‰	Затраты (удельные) энергии в дизельном режиме эксплуатации самосвала, г. у. т. / т · м	Затраты (удельные) энергии в газодизельном режиме эксплуатации самосвала, г. у. т. / т · м
1	3,74	132	75	48,326	41,889
2	3,77	132	75	49,29	40,476
3	3,9	130	78	49,832	39,049
4	4	134	82	45,867	33,424

На основе полученных и обработанных данных построены графики, отражающие энергетическую эффективность карьерных самосвалов, эксплуатирующихся, как в дизельном так и в газодизельном режиме (рис. 4). При обработке полученных данных учитывалась идентичность условий эксплуатации тестируемых карьерных самосвалов.

Как можно увидеть из рисунка 4, распределение затрат (удельных) энергии при перевозке вскрышных пород и твердых минеральных ресурсов карьерными самосвалами, эксплуатирующимися в газодизельном режиме меньше, чем при работе только в дизельном режиме. По этой причине очевидным становится тот факт, что согласно энергетическому критерию оценки эксплуатации технологического транспорта – карьерных самосвалов, наиболее

целесообразно использовать при перевозке горной массы карьерные самосвалы, работающие на газомоторном топливе.

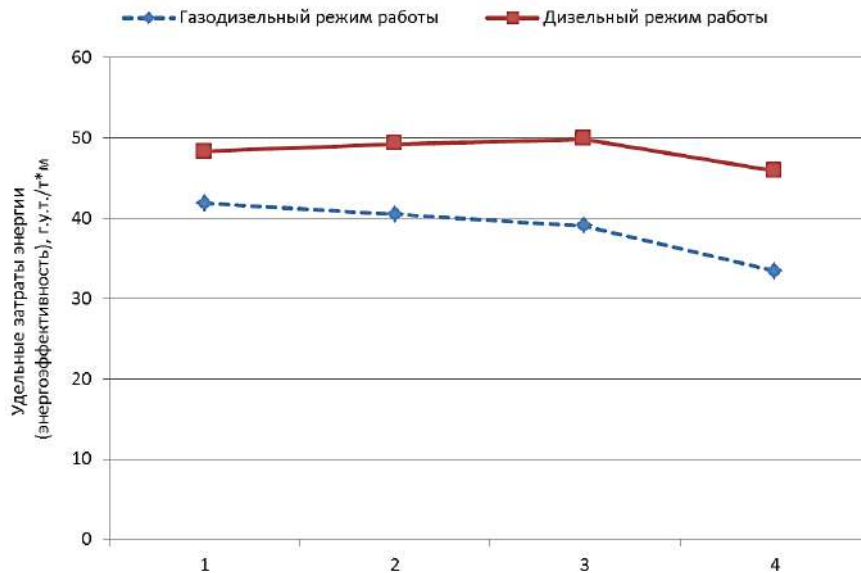


Рисунок 4 – Затраты (удельные) энергии карьерными самосвалами БелАЗ 75131 в процессе эксплуатации в газодизельном и дизельном режимах

Выводы

Применение сжиженного природного газа - СПГ, в качестве газомоторного топлива для технологического оборудования – карьерных самосвалов имеет большие перспективы. СПГ является альтернативным видом газомоторного топлива, которое имеет более низкую стоимость по отношению к дизельному (нефтяному) топливу. Использование СПГ, в качестве газомоторного топлива не требует сложной и трудоёмкой конструктивной доработки двигателей внутреннего сгорания. Экономически целесообразно для использования на карьерных самосвалах. Снижает экологическую нагрузку на окружающую среду. Проведённые исследования говорят о том, что оснащение карьерных самосвалов криогенными бортовыми топливными системами, является одним из перспективных направлений по их модернизации. Однако, отсутствие достаточных технически и научно обоснованных решений, а также методик по оценке технико-экономических показателей криогенных бортовых топливных систем – сдерживает ведущиеся в настоящее время работы по модернизации карьерных самосвалов для обеспечения их эксплуатации на СПГ. По этой причине исследования в области обоснования и выбора конструктивных и схемных решений по размещению и компоновке криогенных бортовых топливных систем на карьерной технике во взаимосвязи с горнотехническими, эргономическими и экологическими требованиями, а также последующее изучение их эксплуатационных характеристик, являются актуальными.

Список литературы

1. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Chegoshv A.A., Ashikhmin V.E. Substantiation of the need to create an eccentric cycloidal gearing transmission of geokhod // E3S Web Conferences. 41, 03008 (2018). – DOI: 10.1051/e3sconf/20184103008.

2. Хазин М.Л. Перевод карьерных самосвалов на газ в условиях севера // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т.19, №1. – С. 56-72. – DOI: 10.15593/2224-9923/2019.1.5.
3. Кузнецов И.В., Паначев И.А., Дубов Г.М., Нохрин С.А. Энергетическая оценка эксплуатации газодизельных карьерных самосвалов БелАЗ-75131 на разрезах Кузбасса // «Справочник. Инженерный журнал». – Москва: «СПЕКТР». – 2019. – №4 (265). С. 19 - 23. –DOI: 10.14489/hb.2019.04. pp. 019-023.
4. Kuznetsov I.V., Panachev I.A., Dubov G.M., Nokhrin S.A. Energy assessment of BelAZ-75131 gas-diesel mining dump trucks operation at Kuzbass open casts // E3S Web of Conferences. 174, 03010 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202017403010.
5. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Kuznetsov I.V., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Prospects for the use of liquefied natural gas as a motor fuel for haul trucks // E3S Web of Conferences 105, 03018 (2019). – DOI: 10.1051/e3sconf/201910503018.
6. Трухманов Д.С., Дубов Г.М., Чегошев А.А., Ельцов И.Е., Нохрин С.А. Методология оценки технико-экономических показателей криогенных бортовых топливных систем карьерных самосвалов БелАЗ, потребляющих в качестве моторного топлива СПГ // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – №3. – С. 32-38. – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-32-38.
7. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Kuznetsov I.V., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Procedure for haul truck on-board LNG fuel systems performance evaluation // E3S Web of Conferences. 105, 03019 (2019). – DOI:10.1051/e3sconf/201910503019.
8. Azikhanov S.S., Bogomolov A.R., Dubov G.M., Nohrin S.A. Development of the instrumentation system for gas-and-diesel fuelled BelAZ dump truck X International Scientific and Practical Conference // MATEC Web of Conferences. 297, 03001 (2019). – DOI: 10.1051/matecconf/201929703001.
9. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Development of technical requirements for on-board cryogenic fuel systems of BelAZ dump trucks // MATEC Web of Conferences. 297, 03002 (2019). – DOI: 10.1051/matecconf/201929703002.
10. Дубов Г.М., Богомолов А.Р., Григорьева Е.А., Нохрин С.А. Анализ причин роста концентрации свинца в отработавшем масле ДВС КТА 50 карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих по газодизельному циклу // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 3. – С.84-93. – DOI: 10.26730/1999-4125-2021-3-84-93.
11. Богомолов А.Р., Азиханов С.С., Дубов Г.М., Григорьева Е.А., Нохрин С.А. Исследование состава выхлопных газов карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих в дизельном и газодизельном режимах // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – №2. – С. 30-41. – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-30-41.
12. Дубов Г.М., Богомолов А.Р., Азиханов С.С., Григорьева Е.А., Нохрин С.А. Исследование расходных и температурных характеристик карьерных самосвалов БелАЗ 75131, работающих в газодизельном режиме // Горное оборудование и электромеханика. –2021. – №3. – С. 20-31. – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-3-20-31.
13. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Nokhrin S.A. The use of alternative fuel for heavy-duty dump trucks as a way to reduce the anthropogenic impact on the environment // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 459, 042059 (2020). – DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042059.
14. Гайнуллин Ф.Г., Гриценко А.И., Васильев Ю.Н., Золотаревский Л.С. Природный газ как моторное топливо на транспорте // М.: Недра. – 1986. – 255 с.

15. Dubov G.M., Trukhmanov D.S., Nokhrin S.A., Sergel A.N. Method for installing cryogenic fuel tanks on the deck of BelAZ 7513 mining dump truck // E3S Web of Conferences. 174, 03016 (2020). – DOI: 10.1051/e3sconf/202017403016.

16. Патент № 2701133, Российская Федерация, МПК В60К 15/07, F17С 13/08 (2006.01). Способ установки криогенных топливных баков на карьерном самосвале: № 2019103118; заявл. 04.02.19; опубл. 24.09.19, Бюл. №27 / Нохрин С.А., Дубов Г.М., Трухманов Д.С.; заявитель ООО "Сибирь-Энерго". – 14 с.: 7 ил.

LIQUEFIED NATURAL GAS AS AN ALTERNATIVE TO DIESEL (OIL) FUEL FOR BELAZ MINING DUMP TRUCKS

¹**Chegoshev A.A.**, (Engineering), Senior Lecturer, e – mail: chegoshevaa@kuzstu.ru

²**Nokhrin S.A.**, (Engineering), Deputy General Director for Gasification of Motor Transport, e – mail: nsa500@mail.ru

³**Eltsov I.E.**, (Engineering), Design Engineer, e – mail: t-pain99@yandex.ru

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Vesennyaya St., 28, Kemerovo, Russian Federation

²«TekhnoEco» LLC, 653046, Azovskaya St., 11, Prokopyevsk, Kemerovo region - Kuzbass, Russian Federation

³«Torginvest » LLC, 650991, Sovetskiy Ave., 25, Kemerovo, Russian Federation

Abstract

A brief analysis of economic and environmental benefits of using liquefied natural gas as a gas-engine fuel is conducted. It is argued that liquefied natural gas is the most promising alternative to oil fuels for high-payload-capacity haul trucks. It is reported that in Russia, in Kuzbass, a complex project for the liquefied natural gas production and its consumption by heavy-duty BelAZ dump trucks has been successfully implemented for the first time. The data on the assessment of the energy performance of the process of hauling overburden and solid minerals by gas-diesel BelAZ 75131 dump trucks are presented. The data show that the energy performance of the process of hauling overburden and solid minerals by dual-fuel (gas-diesel) haul trucks is much less than that of diesel-powered haul trucks.

Keywords: BelAZ dump truck, on-board cryogenic fuel systems, motor fuel, liquefied natural gas, gas-diesel operation.

СЕКЦИЯ 4

SECTION 4

*Средства
технологического
оснащения и
автоматизация
машиностроительных
производств*

*Technological
equipment and
automation of
mechanical
facilities*

УДК 621.9.06

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ТОКАРНЫЙ СТАНОК

*БАЛАШОВ Александр Владимирович¹, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: bavagtu@mail.ru*

*МАРКОВА Маргарита Ивановна¹, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: margarita-markova@inbox.ru*

*СОЛОМИН Дмитрий Евгеньевич
ЧЕРЕПАНОВ Роман Сергеевич*

¹Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
656038, Российская Федерация, г. Барнаул, пр. Ленина, 46

Аннотация

В статье рассмотрены основные этапы проектирования специализированного токарного двухсуппортного станка для растачивания отверстий во втулке. Специализированный станок позволяет растачивать поверхности втулки с правой и левой стороны последовательно с одного установка заготовки. Загрузка заготовок осуществляется автоматически через питатель. Работа главных элементов станка реализуются с помощью шариковинтовых пар и шаговых двигателей. Перемещение рабочих органов станка реализуется через систему ЧПУ.

Для спроектированного станка приведены 3D модель, отдельные чертежи. Описано устройство разработанного оборудования.

Ключевые слова: Специализированный токарный станок, проектирование, 3D-моделирование, конструкторская документация

Введение

Промышленные организации и заводы для эффективного изготовления изделий в крупносерийном производстве используют специализированные средства технологического оснащения.

Например, на машиностроительном заводе в Алтайском крае для изготовления втулки, рисунок 1, применяют два специальных токарных автомата.

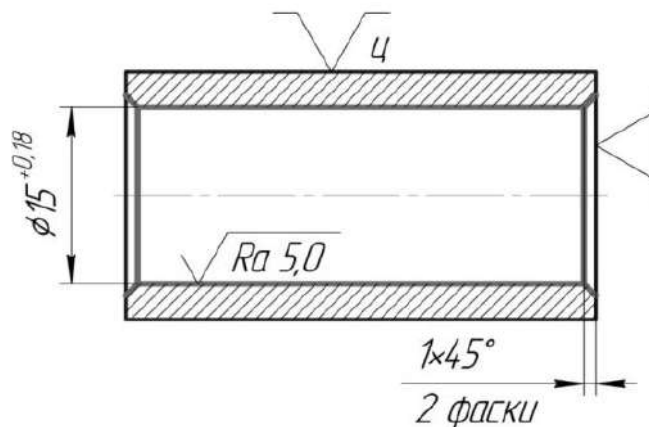


Рисунок 1 – Операционный эскиз обработки отверстия втулки

Первый токарный автомат растачивает отверстие и снимает фаску с правого торца втулки, второй автомат – растачивает фаску с левого торца втулки. Перемещения рабочих органов станка, автоматическая загрузка заготовок и выгрузка деталей реализуется посредством кулачкового механизма. 3D модель токарного кулачкового автомата и фотография рабочей зоны станка приведены на рисунке 2.

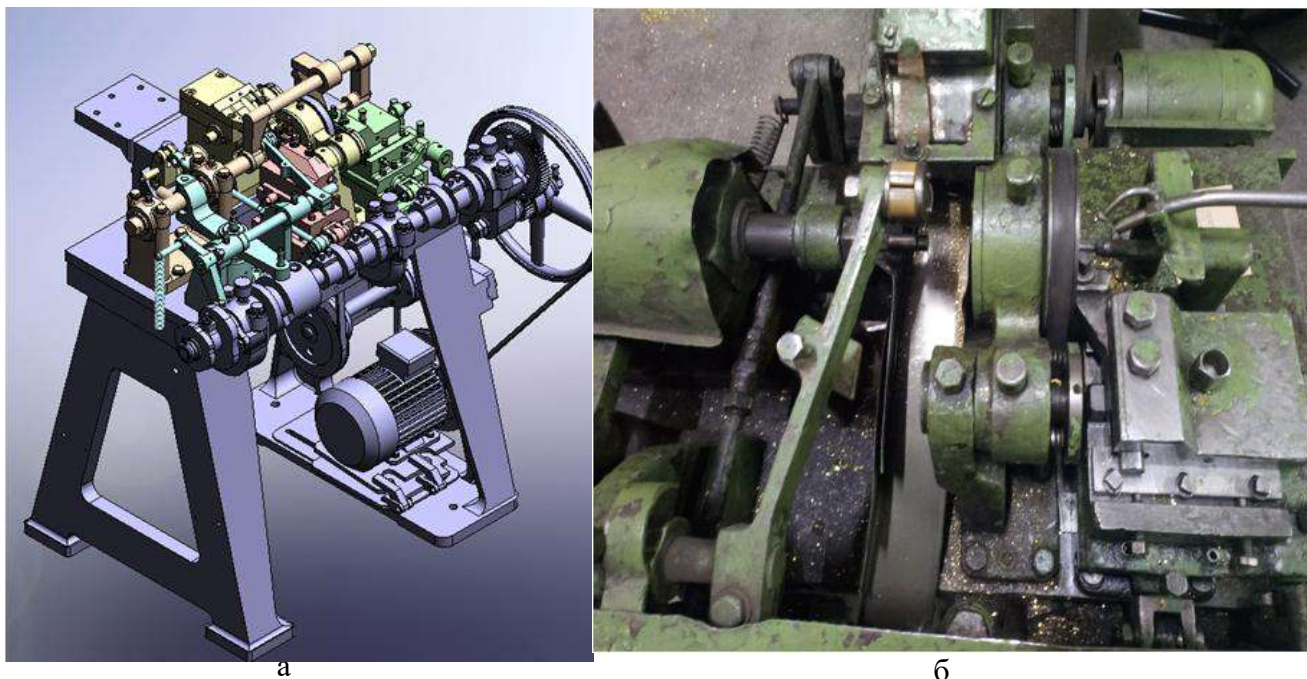


Рисунок 2 – Специальный токарный автомат для растачивания отверстий втулки:
а - 3D модель токарного автомата; б – рабочая зона автомата

Растачивание поверхностей втулки (рисунок 1) выполняется специальными расточными резцами с нестандартной державкой. Для реализации технологического процесса предприятие вынуждено собственными силами изготавливать режущий инструмент, так как установить современный инструмент невозможно. Используемое оборудование не переносится и простаивает после завершения изготовления партии изделий. Оборудование работает с 1960 г., морально устарело и физически изношено. Значительный износ кулачкового механизма, направляющих станины и суппортов вызывает вибрации, что ведет к частой поломке режущих инструментов.

Для обеспечения стабильности процесса резания предприятие планировало выполнить капитальный ремонт автоматов. Анализ износа узлов и деталей автомата выявил, что ремонт автомата потребует изготовления кулачкового вала, толкателей, шкивов, восстановления направляющих суппортов, замена электродвигателя, подшипников и ремней. Ремонт потребует значительных материальных вложений и вывода оборудования из эксплуатации минимум на 4 месяца.

Предприятие рассматривало возможность покупки малогабаритного токарного станка с ЧПУ. Однако на рынке отсутствует специализированное оборудование, с автоматической загрузкой заготовок и выгрузкой деталей, обеспечивающее необходимую производительность.

Выходом из сложившейся ситуации является проектирование, изготовление и отладка специализированного станка. В соответствии с заказом машиностроительного завода сотрудники АлтГТУ спроектировали специализированный токарный станок для растачивания отверстия и снятия фасок во втулке. В настоящее время спроектированный станок изготавливается на предприятии – заказчике.

Описание

В соответствии с Единой системой конструкторской документации, ГОСТ 2.103-2013 «Стадии разработки» на первой стадии разработки специализированного станка разрабатывалась проектная конструкторская документация. Изучено и проанализировано техническое задание [1]. Основные элементы технического задания приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные элементы технического задания

Элемент	Формулировка или значение
1. Наименование темы	Проектирование специализированного токарного станка для растачивания фасок и отверстия втулки XXX.XXXX.XXXX.
2. Цель работы	Спроектировать специализированный токарный станок для растачивания фасок и отверстия втулки XXX.XXXX.XXXX.
3. Задачи	Проектирование принципиальной схемы токарного станка. Подбор режущих инструментов для обработки поверхностей втулки. Выбор комплектующих для создания токарного станка. Разработка 3D-компоновки токарного станка. Рабочее проектирование конструкции токарного станка. - Теоретические расчеты токарного станка Оформление конструкторской документации токарного станка.
4. Ожидаемые результаты	Точность позиционирования рабочих органов станка, не более, мм – 0,03. Мощность главного электродвигателя, кВт – 1,1. Производительность, не менее, шт/мин – 2. Количество независимых суппортов – 2. Возможность переналадки для изготовления втулок другой номенклатуры – имеется. Возможность автоматической загрузки заготовок и выгрузки деталей – имеется.

При реализации первой стадии разработки определена схема базирования заготовки, выбран режущий инструмент (рисунок 3), определены силы резания.

Осевая сила резания составила 350 Н. Радиальная сила резания составила 104 Н.

Результатом выполнения первой стадии разработки стал технический проект. Технический проект представляет электронный макет токарного станка, рисунок 4.

Специализированный станок в соответствии с электронным макетом растачивает поверхности втулки (рисунок 1) с правой и левой стороны последовательно с одного установка заготовки.

Станок состоит из станины 1, шпиндельного узла 2, правого 4 и левого 3 суппортов, систем загрузки заготовок 6 и выгрузки детали 15 (рисунок 4). Перемещение суппортов и толкателя реализуются с помощью шариковинтовых пар 10 и шаговых двигателей 12 [2, 3].

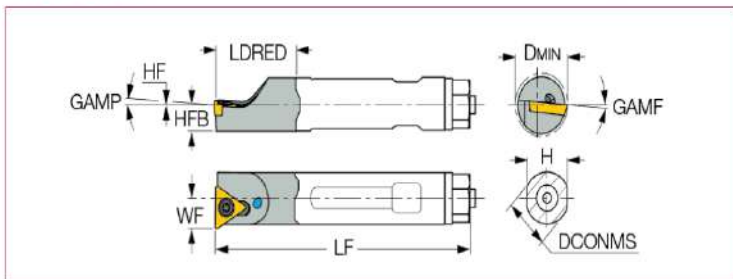
Наглядное представление о компоновке, структуре, типах устройств, необходимых для передачи движения исполнительным элементам станка дает кинематическая схема. Кинематическая схема станка приведена на рисунке 5.

Принятая компоновка станка предполагает наличие пяти управляемых координат, перемещения по координатам X1, Z1 правого суппорта, по координатам X2, Z2 левого суппорта и перемещение штока толкателя по координате Z3. Перемещение рабочих органов станка будет реализовываться через систему ЧПУ.

Для согласования перемещения правого и левого суппортов, систем загрузки заготовок и выгрузки деталей, включение и выключение шпинделя и длительности перемещения рабочих органов станка, составляющих общий автоматический цикл, разработана циклограмма работы станка, рисунок 6.

ISOTURN

Family Designation: **E-STFCR-HEAD** Interchangeable screw clamped boring heads carrying the positive 7° clearance triangular inserts mounted on carbide bars.



Right-hand shown



Item Designation: **E12 STFCR-11 HEAD**

Non ISO ISO 13399

DCONMS	LF	LDRED	H	HFB	WF	HF	GAMP	GAMF	DMIN	HAND	MIND
12.00	179.00	24.8	11.0		6.80	0.0	0	-6	13.80	R	TCMT 110202-F3P

Рисунок 3 – Расточной резец для обработки отверстия и фасок втулки

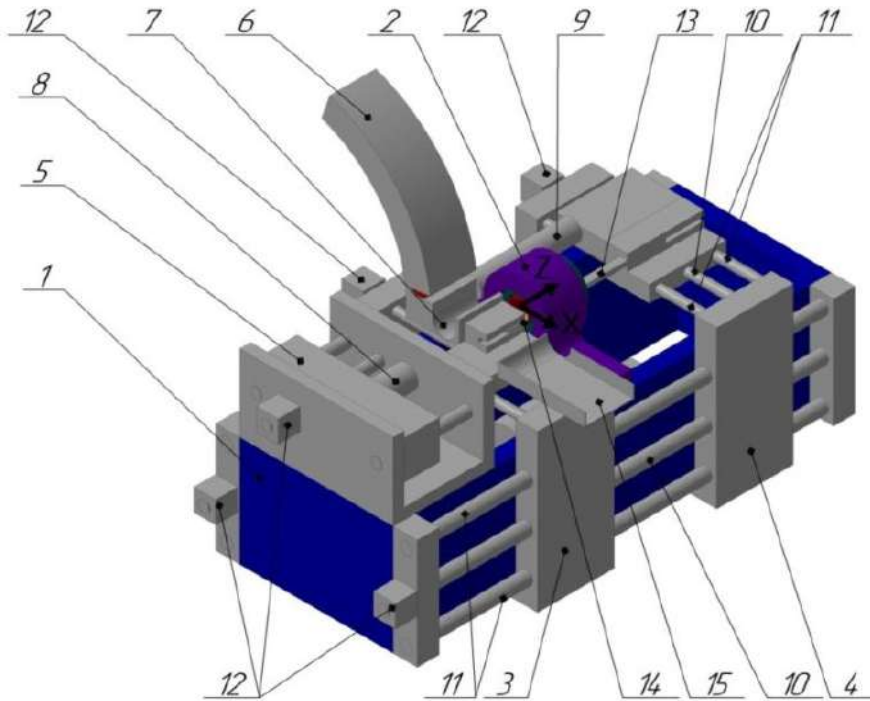


Рисунок 4 – Электронный макет токарного станка:

1 – станина, 2 – шпиндельный узел, 3 – левый суппорт, 4 – правый суппорт, 5 – толкатель, 6 – питатель, 7 – лоток питателя, 8 – шток толкателя, 9 – выталкиватель, 10 - шариковинтовая пара, 11-направляющие, 12 – шаговые двигатели

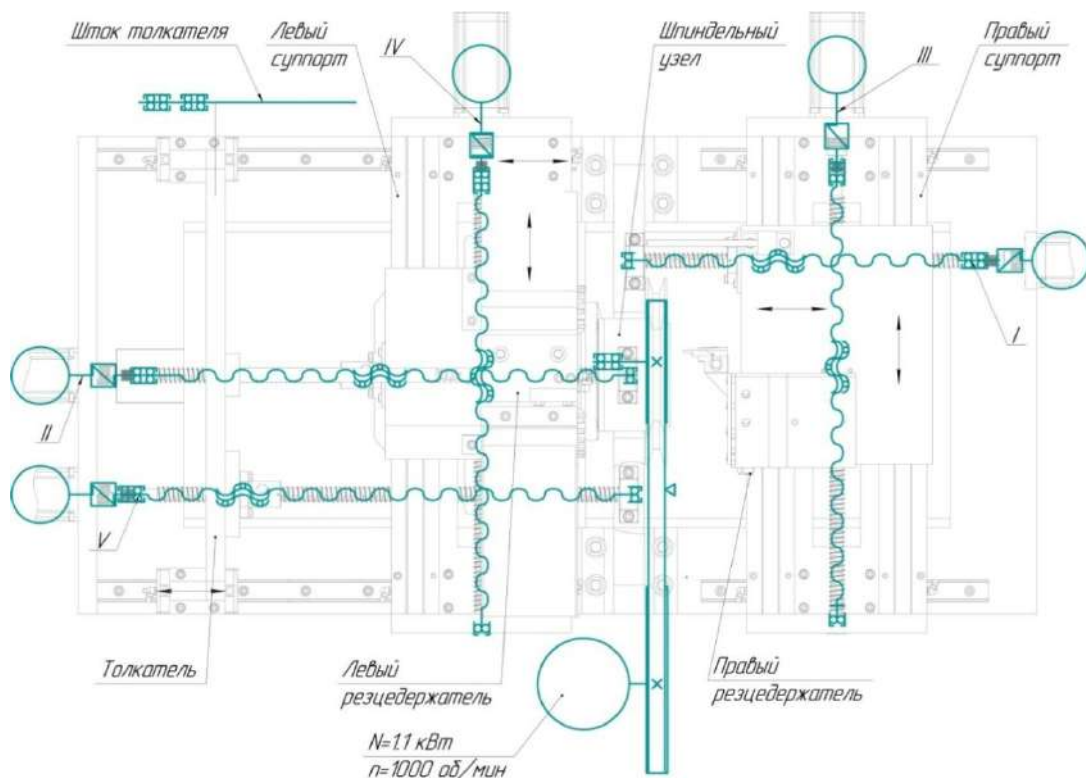


Рисунок 5 – Кинематическая схема

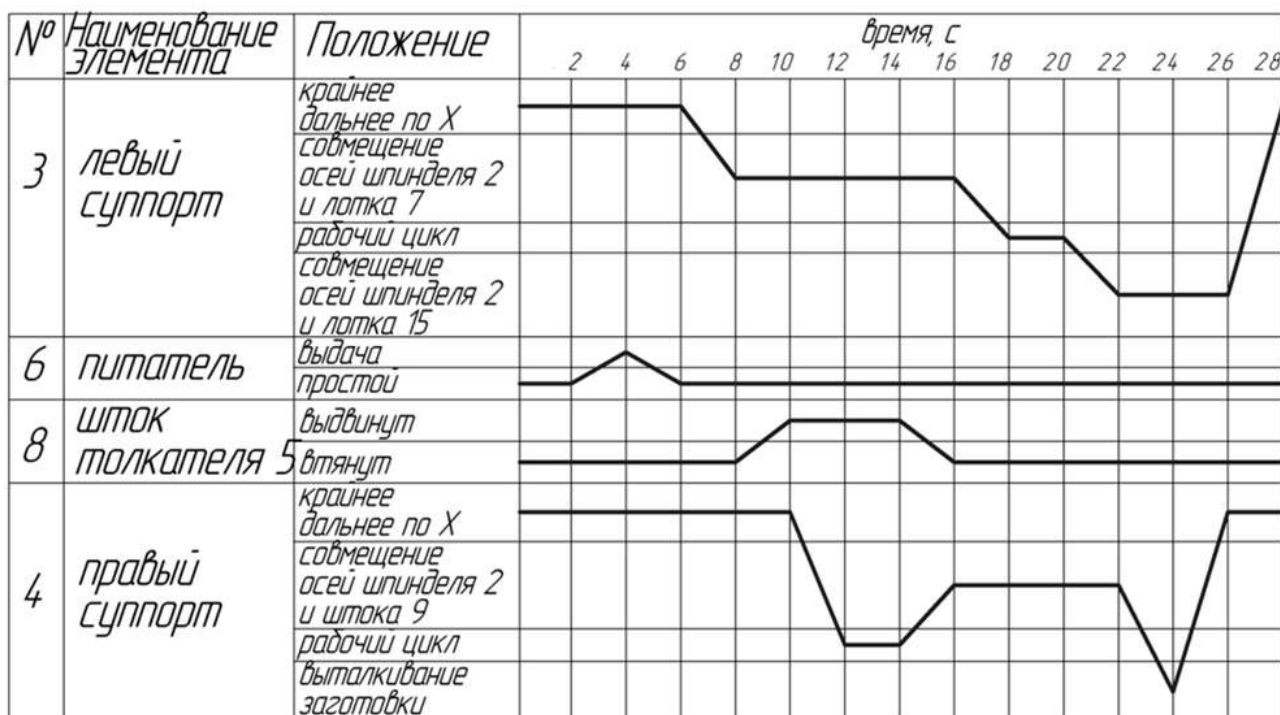


Рисунок 6 – Циклограмма работы станка

Конструкторская документация технического проекта была рассмотрена и утверждена созданной комиссией, состоящей из сотрудников предприятия-заказчика и исполнителя технического задания.

На второй стадии проектирования разрабатывалась конструкторская документация для изготовления и испытания опытного образца специализированного токарного станка для растачивания отверстия и фасок во втулке [4].

Исходными данными для разработки конструкторской документации стали масса левого и правого суппортов станка, не более 30 кг, определенных по электронному макету и силе резания. Определены характеристики шаговых двигателей для перемещения левого и правого суппортов, системы питания станка заготовками. Выбраны шаговые двигатели, шариковинтовые пары, подшипниковые узлы, направляющие, подшипники скольжения и другие элементы токарного станка. Назначен материал плит суппортов станка, алюминиевый сплав – ДТ6Т.

Разработанная 3D модель станка показана на рисунке 7.

Разработана конструкторская документация на станок, включающая сборочный чертеж станка, сборочные чертежи узлов, чертежи деталей, спецификаций на станок и сборочные чертежи, принципиальная электрическая схема, схема внешних электрических соединений, схема внутренних электрических соединений, электромонтажный чертеж, ведомость покупных изделий.

В качестве примеров приведены сборочный чертеж шпиндельного узла, рисунок 8 и принципиальная электрическая схема, рисунок 9.

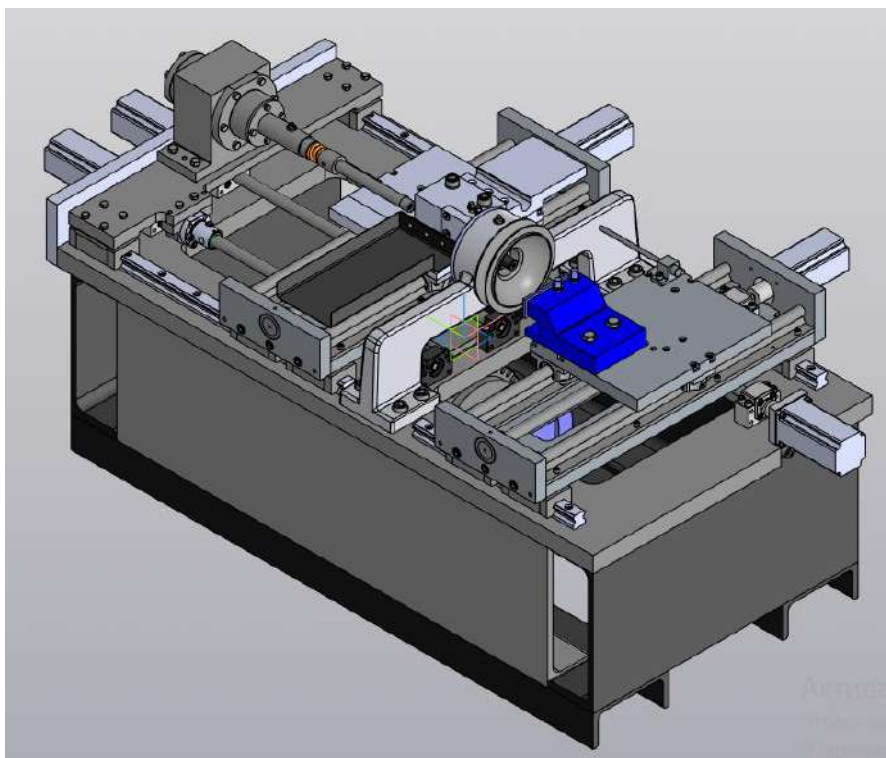


Рисунок 7 – 3D модель станка

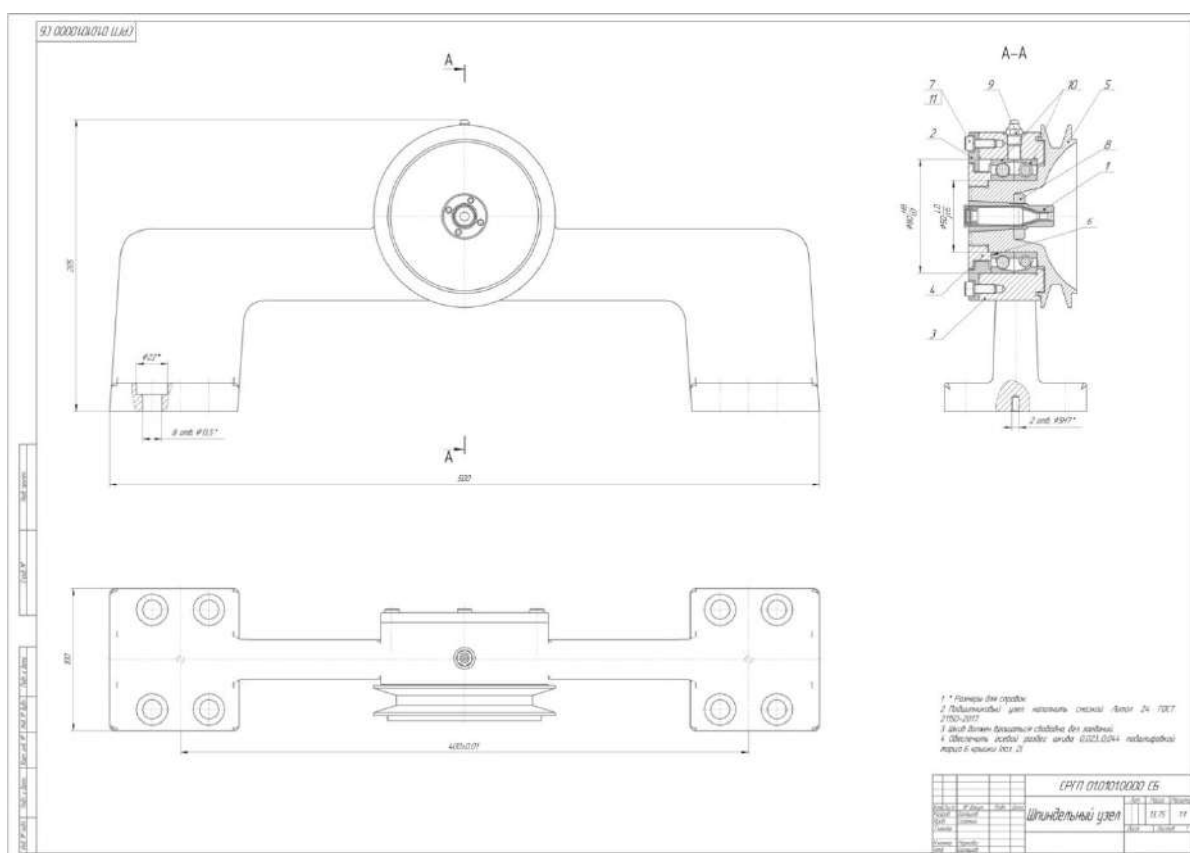


Рисунок 8 – Чертеж шпиндельного узла

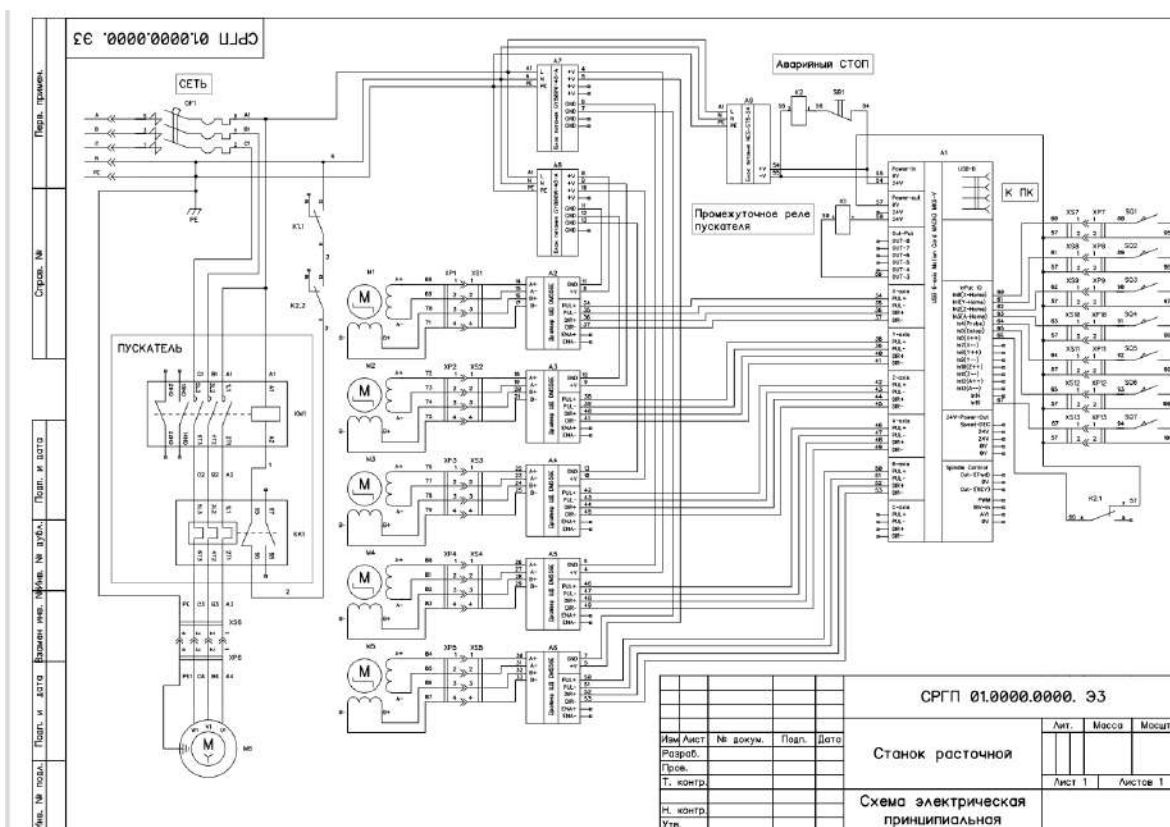


Рисунок 9 – Схема электрическая принципиальная

Спроектированный станок соответствует техническому заданию.

В настоящее время на предприятии-заказчике изготавливается опытный образец специализированного токарного станка для растачивания отверстия и снятия фасок во втулке. После изготовления станка будут проведены его предварительные испытания. При необходимости скорректирована рабочая документация. Проведены приёмочные испытания.

Выводы

Проведенный анализ спроектированного станка показал работоспособность конструктивных элементов.

Создание двухсуппортного станка для машиностроительного завода позволит обеспечить качество выпускаемой продукции с заданной программой выпуска и низкой себестоимостью.

Список литературы

1. Аскалонова Т.А. и др. Проектирование технологических систем. Аскалонова Т.А., Балашов А.В., Марков А.М., Ситников А.А., Татаркин Е.Ю., Татаркина Ю.Н., Фёдоров В.А., Черепанов А.А. Старый Оскол, 2014.

2. Балашов А.В., Маркова М.И., Черепанов Р.С. Проектирование токарного станка с ЧПУ на базе мехатронных модулей. Ползуновский альманах. 2019. № 3. С. 47-50.

3. Балашов А. В., Маркова М. И., Соломин Д.Е., Черепанов Р.С. Специализированный токарный станок на базе мехатронных модулей. Инновации в машиностроении: материалы

XI Международной научно-практической конференции (22–23 октября 2020 года, г. Бийск) / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. –Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2020.С. 196-200.

4. Потапов И.С., Балашов А.В., Черданцев А.О. Параметрическое моделирование элементов малогабаритных токарных станков с ЧПУ. В сборнике: Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы - перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов. сборник научных статей II международной молодежной научно-технической конференции: в 2 томах. 2016. С. 118-122.

SPECIALIZED LATHE BASED

Balashov A.V., PhD (Engineering), Associate Professor, e-mail: bavagtu@mail.ru

Markova M.I., PhD (Engineering), Associate Professor, e-mail: margarita-markova@inbox.ru

Solomin D.E.

Cherepanov R.S.

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

Abstract

The article describes the main stages of designing a specialized lathe with two calipers for boring holes in the bushing. A specialized machine allows you to process the inner surfaces of the sleeve from the right and left sides sequentially from one installation of the workpiece. The workpieces are loaded automatically through the feeder. The work of the main elements of the machine is realized with the help of ball screw pairs and stepper motors. The movement of the working bodies of the machine is realized through the CNC system.

For the designed machine, a 3D model and separate drawings are provided. The device of the developed equipment is described.

Keywords: Specialized lathe, design, 3D modeling, design docum.

УДК 621.7.044.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИСТОВОГО МНОГОВИТКОВОГО ИНДУКТОРА ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ ПЛОСКОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКЕ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

*БОБИН Константин Николаевич, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: yabkn@ya.ru*

*БОБИН Павел Николаевич, аспирант,
e-mail: bobinpn@mail.ru*

*ДЕТИНОВ Максим Борисович, аспирант,
e-mail: punishmentmail@yandex.ru*

*ТРУШИН Константин Станиславович, аспирант,
e-mail: ___tru___@mail.ru*

¹Новосибирский государственный технический университет, 630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. пр. К. Маркса, 20

Аннотация

В работе оценивалась возможность применения многовиткового листового индуктора из алюминиевого сплава Д1АМ с межвитковой изоляцией акриловым изоляционным лаком для печатных плат Plastik 71 для плоской листовой штамповки импульсным магнитным полем. Экспериментальные исследования показали, что такая конструкция индуктора может применяться в качестве разовой. При условии восстановления лаком межвитковой изоляции после каждого импульса индуктор может выдержать 3-5 импульсов до существенного деформирования.

Ключевые слова: магнитно-импульсная штамповка, экспериментальные исследования, индуктор, электроизоляционный лак, алюминиевый сплав

Введение

Одним из принципиальных отличий авиационного производства от общего машиностроения является многономенклатурность и малодетальность серий изготавливаемых деталей [1, 2]. Это приводит к необходимости использования альтернативных технологий вместо инструментальной штамповки. Одной из таких технологий является магнитно-импульсная штамповка. В связи с многообразием геометрических форм и параметров листовых деталей летательных аппаратов не всегда удается применять для изготовления деталей подходящие универсальные индуктора [3]. В таких случаях можно использовать специальные конструкции индукторов [3-5], но тогда возникает проблема экономической целесообразности применения в таком случае магнитно-импульсной штамповки, так как стоимость изготовления специального индуктора неизбежно переходит в стоимость изготовления детали. Решение этой проблемы видится в применении технологичных и дешевых специальных конструкций индукторов с небольшой долговечностью [6].

Проводились экспериментальные исследования конструкции многовиткового листового индуктора из алюминиевого сплава Д1АМ. Целью исследований являлось получение

максимально технологичной конструкции индуктора для плоской листовой штамповки, которая позволит изготавливать серию из 12 деталей до разрушения индуктора.

Описание экспериментальных исследований

Индуктор имел 4 витка, внутренний и наружный диаметры спирали составляли $d=18$ мм и $D=78$ мм, соответственно (рис. 1), толщина индуктора составляла 3 мм. Один токовывод изготавливался заодно со спиралью, а второй токовывод изготавливался из меди М1 и приклепывался к центральной части индуктора. Центральная часть индуктора изготавливалась в виде небольшой площадки для возможности присоединения второго токовывода с помощью заклепок и для уменьшения давления электромагнитного поля от второго токовывода (рис. 2). Изготовление алюминиевой спирали производилось лазерной резкой с последующим снятием окалины. Всего для исследований было изготовлено 3 индуктора.

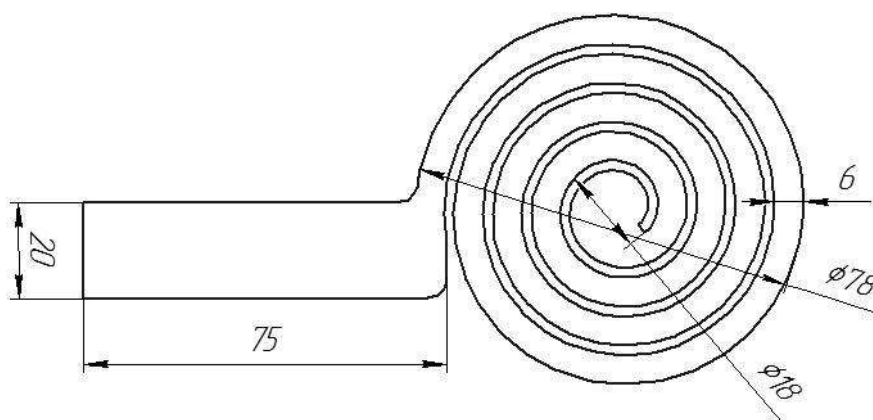


Рисунок 1 – Конструкция и размеры 4х виткового индуктора



Рисунок 2 – Схема присоединения медного токовывода к центру алюминиевого индуктора

Одной из составляющих технологичности и долговечности индукторов является изоляция витков индукторов. Выполняя хорошую изоляцию витков мы закладываем долговечность индукторов, но ухудшаем технологические и экономические свойства. Обычно создание хорошей изоляции индукторов включает в себя намотку лавсановой ленты и дополнительно даже стеклотенты на всю спираль индуктора, а также последующую заливку полиме-

ром. Операция намотки лент трудоемка, выполняется вручную, автоматизация процесса для большинства конструкций индукторов на текущий момент не возможна, поэтому отказ от этой операции с одной стороны и сохранение приемлемых характеристик долговечности с другой стороны позволило бы улучшить технологичность и снизить стоимость изготовления индукторов. На первом этапе исследований было решено для межвитковой изоляции использовать лак акриловый изоляционный для печатных плат Plastik 71. Лак наносился распылением на поверхность индуктора в три слоя с предполагаемой толщиной каждого слоя в 20 мкм и сушкой в течение 2 часов каждого слоя. Дополнительно между индуктором и заготовкой располагалась лавсановая пленка толщиной 0,5 мм.

В качестве технологической операции была выбрана гибка прямых бортов как наименее энергоемкая, но в то же время наиболее сложная по прочностным режимам работы для индуктора операция. Для гибки использовались плоские образцы с размерами 50*50 мм. Материалом образцов был сплав АМцМл2,0. Высота штампуемого борта составляла 9 мм. Для изготовления форм-блока использовались сталь 45. Размеры форм-блока выбирались заведомо больше размеров образцов с радиусом скругления по линиигиба равной 3,2 мм. Изготовление форм-блока производилось механической обработкой резанием.

Штамповка ИМП осуществлялась на магнитно-импульсной установке МИУ-10ВЧ. Установка квадратного образца производилась таким образом, чтобы на штампуемый борт по возможности действовало максимальное и равномерно-распределенное по поверхности заготовки давление от индуктора (рис. 3).

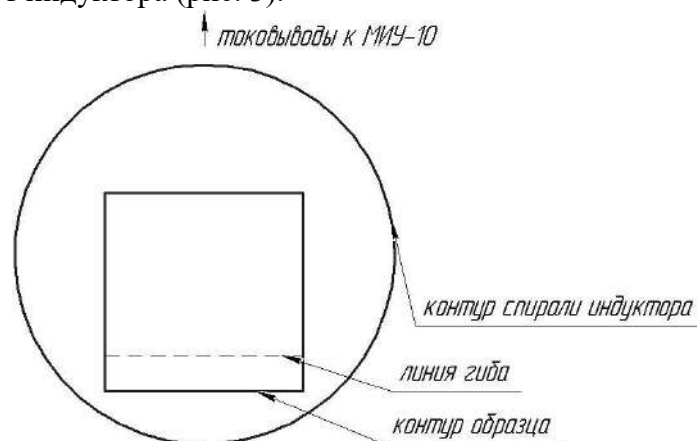


Рисунок 3 – Схема установки квадратных образцов под круглым индуктором

Расчет энергии импульса для формообразования прямого борта производился по методикам, описанным в работах [7-9], и затем экспериментально уточнялся для каждого материала индуктора. Полученное расчетное значение энергии импульса для медного индуктора составило около $W=1,7$ кДж при напряжении зарядки $U=5,9$ кВ. Расчетная энергия импульса необходимая для калибровки составила $W=6,5$ кДж при напряжении зарядки $U=11,7$ кВ.

Первый образец со спиралью из алюминия испытывался при энергиях 1,2 кДж, 2,4 кДж, 4 кДж. Второй образец со спиралью из алюминия испытывался при энергиях 2,6 кДж, 1,2 кДж и 2,6 кДж, 1,2 кДж и 2,6 кДж. Было определено, что оптимальное значение энергии для гибки прямого борта составляет 2,4 кДж при одиночном импульсе и 1,2 кДж и 2,6 кДж при первом частично формоизменяющем и втором калибрующем. Как и в работе [10] в случае двух импульсов прилегание борта было более плотное.

При увеличении количества импульсов наблюдается постепенное деформирование спирали индуктора в виде раскручивания и уменьшения межвиткового расстояния между

витками (рис. 4). Величина деформирования спирали индуктора при отдельном импульсе зависит от усилия прижима индуктора к заготовке. Очевидно, что увеличение силы прижима индуктора позволяет снимать часть пондеромоторных усилий со спирали индуктора за счет сил трения. Предельной величиной нагрузки для такого индуктора является энергия 4кДж. При данной энергии индуктор окончательно теряет свою форму и постоянство ширины витков, поэтому дальнейшее его использование навряд ли позволит получить качественную деталь. При испытаниях наблюдалось искрение в пространстве между витками индуктора, причем чем больше импульсов сообщалось индуктору, тем сильнее происходило искрение. Визуальный осмотр спиралей после импульсов показал, что происходит постепенное растрескивание и откалывание изоляционного лака. При количестве импульсов более 3х наблюдается достаточно сильно искрение, а при больших энергиях (например, при 4кДж) происходит пробой лавсановой пленки между спиралью и заготовкой и проплавление поверхности детали. Очевидно, что разрушение изоляции происходит из-за недостаточной жесткости спирали из алюминиевого сплава и хрупкости лака.



Рисунок 4 – Деформация индукторов из алюминиевой спирали после серии импульсов

Таким образом, акриловый изоляционный лак для печатных плат Plastik 71 можно использовать для межвитковой изоляции витков индуктора только для разового применения. Многовитковый листовой индуктор из алюминиевого сплава Д1АМ имеет долговечность 3-5 импульсов. При условии постоянного нанесения после каждого импульса в качестве межвитковой изоляции лака для печатных плат Plastik 71 можно предотвратить повреждение поверхности изготавливаемых деталей.

Выводы

1 Акриловый изоляционный лак для печатных плат Plastik 71 можно использовать в качестве межвитковой изоляции многовитковых листовых индукторов для плоской листовой штамповки импульсным магнитным полем только в качестве одноимпульсной межвитковой изоляции.

2 Многовитковый листовой индуктор из алюминиевого сплава Д1АМ для плоской листовой штамповки импульсным магнитным полем имеет долговечность 3-5 импульсов.

3 При применении листовых индукторов в процессах листовой штамповки импульсным магнитным полем необходимо создавать максимальное усилие прижима индуктора к заготовке для повышения долговечности индуктора.

4 Необходимы дальнейшие исследования по оценке возможности применения в конструкции многосвитковых листовых индукторов других электропроводных материалов для изготовления спирали и других электроизоляционных материалов.

Список литературы

1. Горбунов М.Н. Основы технологии производства самолетов. - М.: Машиностроение, 1976. - 258 с.
2. Уменьшение дефектов сплошности тонколистовых деталей летательных аппаратов магнитно-импульсной обработкой Бобин К.Н. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сибирская аэрокосмическая академия им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2011
3. Psyk, V.; Risch, D.; Kinsey, B.L.; Tekkaya, A.E.; Kleiner, M. Electromagnetic forming—A review. *J. Mater. Process. Technol.* 2011, 211, 787–829
4. Psyk, V.; Beerwald, C.; Henselek, A.; Homberg, W.; Brosius, A.; Kleiner, M. Integration of Electromagnetic Calibration into the Deep Drawing Process of an Industrial Demonstrator Part. *Key Eng. Mater.* 2007, 344, 435–442.
5. Астапов В.Ю. Изготовление листовых окантовок люков летательных аппаратов магнитно-импульсным способом и моделирование с использованием САПР // В.Ю. Астапов, Л.Л. Хорошко, М.С. Джоздани, А.Л. Хорошко // Труды МАИ. - 2017. - № 95. - С. 26.
6. Woodward, S., 2011. Springback Calibration of Sheet Metal Components Using Impulse Forming Methods. Degree Master of Science. Thesis, The Ohio State University
7. Белоусов В.С. Физические основы лазерной и магнитно-импульсной обработки. Уч. пособие. – Новосибирск: НЭТИ, 1991. – 63 с.
8. Карпухин В.Ф. Определение параметров магнитно-импульсной формовки // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. - 2012. - № 5(36). - С. 228-232.
9. Юдаев В.Б. Применение импульсных магнитных полей для формообразования деталей летательных аппаратов. Учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию. – М.: МАИ, 1995. – 168 с.
10. Бобин К. Н. Экспериментальные исследования воздействия заготовки на технологическую оснастку при одностороннем магнитно-импульсном нагружении / К. Н. Бобин, М. Б. Детинов, Н. В. Курлаев // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири : сб. статей 12 международного науч.-практ. конф., г. Иркутск, 27 мая – 1 июня 2019 г. – Иркутск : Изд-во ИРНТУ, 2019. – С. 61–67.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE POSSIBILITY OF USING A MULTI-TURN ALUMINUM ALLOY SHEET INDUCTOR FOR FLAT SHEET STAMPING WITH A PULSED MAGNETIC FIELD

Bobin K.N., D.Sc. (Engineering), associate professor, e – mail: *yabkn@ya.ru*

Bobin P.N., PhD student, e – mail: *bobinpn@mail.ru*

Detinov M.B., PhD student, e – mail: *punishmentmail@yandex.ru*

Trushin K.S., PhD student, e – mail: *__tru__@mail.ru*

Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

The aim of the research was to obtain the most producible design of coil for flat sheet metal stamping, which would make it possible to produce a series of 12 parts before the destruction of the coil. The coil had 4 turns. The inner and outer diameters were 18 mm and 78 mm, respectively. The thickness was 3 mm. The coil was made of aluminum alloy D1AM with the insulated acrylic varnish for printed circuit boards Plastik 71 between turns. This design of coil for the flat sheet stamping was tested. The experimental results proved that such design of coil is disposable. The coil may be used 3-5 times up to significant deformation if insulation varnish between the turns recovers after each impulse.

Keywords: magnetic pulse processing, experimental results, coil, insulating varnish, aluminum alloy.

УДК 621.914.1

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СБОРНОЙ ТОРЦОВОЙ ФРЕЗЫ С ДЕМПФИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ПРИ РАБОТЕ НА СТАНКАХ С ЧПУ

*КРЯЖЕВ Юрий Анатольевич¹, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: kryazhev57@mail.ru
ГОРИН Евгений Юрьевич,² аспирант,
e-mail: evgenijgorin@gmail.com*

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, 656038,
Российская Федерация, г. Барнаул, пр. Ленина, 46

Аннотация

Для решения задачи повышения виброустойчивости процесса фрезерования на станках с ЧПУ были проведены экспериментальные исследования предложенной конструкции сборной торцовой фрезы с демпфирующими элементами из резины и фторопласта на различных режимах резания при совместной оценке коэффициента динамичности по скорости счёта сигнала акустической эмиссии (САЭ) – Кдин и параметра шероховатости – Ra. Построены графики изменения коэффициента динамичности по скорости счёта САЭ – Кдин и шероховатости по параметру Ra для исследуемого диапазона режимов фрезерования.

Ключевые слова: фреза, торцовое фрезерование, коэффициент динамичности, шероховатость, скорость счёта, демпфирующие элементы.

Введение

При механической обработке возникают вибрации (механические колебания) всех звеньев технологической системы: станок-приспособление-инструмент-деталь (СПИД). Появление колебаний связано с различными физическими процессами, возникающими в системе СПИД [1, 2, 3].

В известных работах Кудинова В.М. [3], Подураева В.Н. [4], Прилуцкого В.А. [5] и других авторов отмечено, что динамические особенности процесса резания, связанные с потерей устойчивости в результате возникновения автоколебаний, являются причиной образования на обработанной поверхности «следов» от предшествующей обработки, ухудшающих параметры шероховатости и волнистости. В этой связи Жарков И.Г. [1] рекомендует для повышения виброустойчивости и производительности режущих инструментов использовать с большим успехом не увеличение их жёсткости, а повышать их демпфирующую способность.

Поэтому для решения задачи повышения виброустойчивости процесса фрезерования на станках с ЧПУ было принято – проводить исследования по «подавлению» колебаний за счёт установки демпфирующих элементов в конструкции инструментальной сборки фрезы [6].

Эксперименты проводились на фрезерном станке ГФ-2171 с УЧПУ FMS 3000 при использовании конструкции сборной торцовой фрезы с демпфирующими элементами на различных режимах фрезерования заготовки из легированной стали 18Х12Н10Т. Для регулирования жёсткости сборной торцовой фрезы использовались резиновые, стальные и фторопластовые вставки (демпфирующие элементы), количество которых может изменяться в зави-

симости от требуемых условий резания и значений собственной частоты режущего инструмента.

Одновременно с процессом резания проводилась запись сигналов акустической эмиссии (САЭ). Запись осуществлялась с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) L-card L780M с частотой дискриминации (ограничения) до 400 кГц. По окончании эксперимента проводилось измерение шероховатости обработанной поверхности заготовки на профилографе-профилометре «HOMMEL TESTER W55». Анализ сигналов акустической эмиссии позволил установить зависимости параметра шероховатости R_a от средней амплитуды – A и скорости счёта акустической эмиссии – \dot{N} [8]. Для установления зависимости параметра шероховатости R_a от параметров режима торцового фрезерования (V , S , t) был проведён плановый эксперимент типа ПЭФ 3².

Полученные зависимости $R_a = f(V, S, t)$, $R_a = f(A)$ и $R_a = f(\dot{N})$ были использованы в технологически ориентированном измерительном комплексе для диагностирования и прогнозирования параметров качества обработанной поверхности при фрезеровании на станках с ЧПУ[7].

Проведённые эксперименты показали, что параметр сигнала акустической эмиссии – скорость счёта – \dot{N} является более информативным параметром САЭ при оценке демпфирующих свойств упругих элементов в исследуемой конструкции сборной торцовой фрезы. Поэтому нами было предложено использовать для сравнительной оценки демпфирующей способности инструментальной наладки (выходного звена) в технической системе СПИД – отношение скорости счёта САЭ – \dot{N} до введения демпфирующих элементов и после введения демпфирующих элементов (упругих звеньев) в конструкцию сборного режущего инструмента. Данное отношение параметров акустической эмиссии при механической обработке будем называть коэффициентом динамичности – $K_{дин}$. Коэффициент динамичности по скорости счёта САЭ определялся: $K_{дин} = \dot{N}_{i-1} / \dot{N}_i$, где

\dot{N}_i – скорость счёта САЭ с демпфирующими элементами, имп/с;

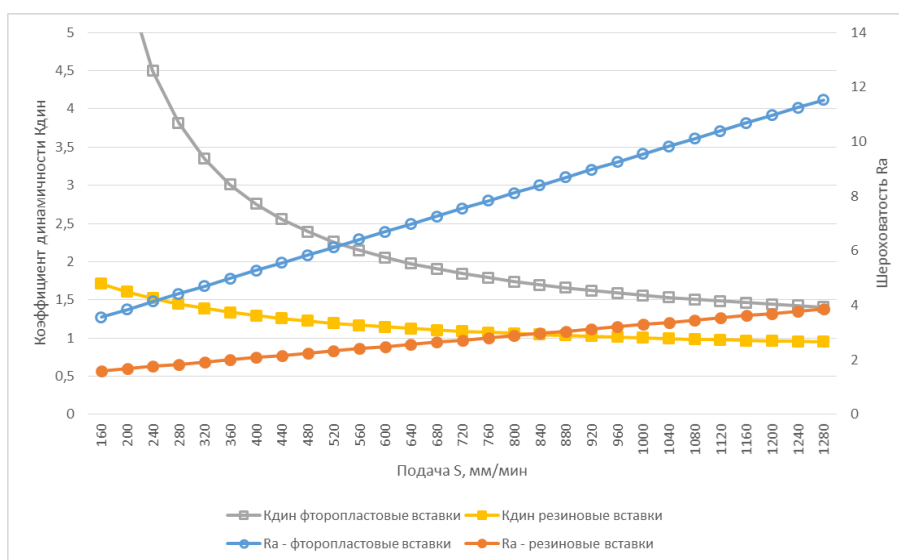
\dot{N}_{i-1} – скорость счёта САЭ до установки демпфирующих элементов, имп/с.

Анализ результатов экспериментальных исследований инструментальной наладки (сборки) на станке с ЧПУ – по предложенному коэффициенту динамичности скорости счёта САЭ – $K_{дин}$ показал, что данный параметр достаточно точно характеризует демпфирующие способности сборного инструмента с демпфирующими элементами, изготовленными из различных материалов. На рисунках 1, 2, 3 приведены результаты экспериментальных исследований предложенной конструкции сборной торцовой фрезы с демпфирующими элементами из резины и фторопласта на различных режимах резания при совместной оценке коэффициента динамичности по скорости счёта САЭ – $K_{дин}$ и параметра шероховатости – R_a .

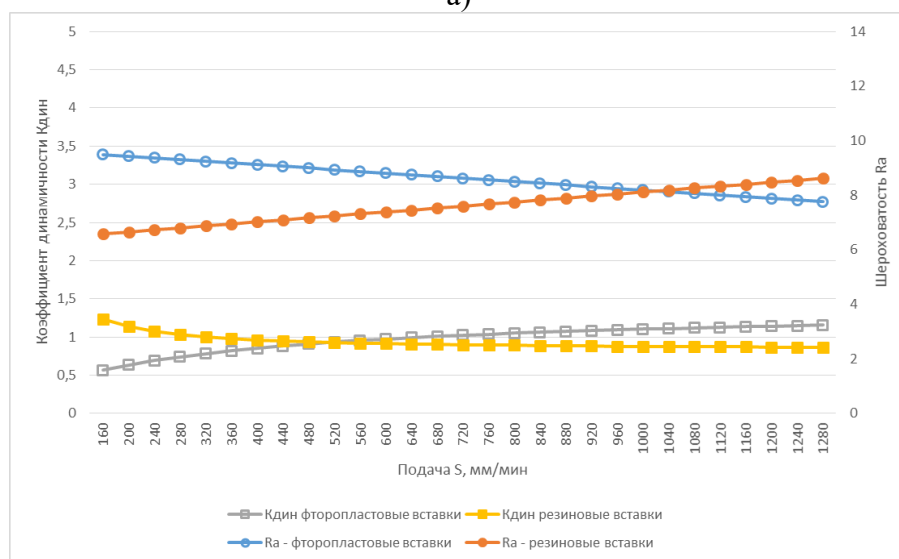
На рисунке 1а показаны графики изменения коэффициента динамичности по скорости счёта САЭ – $K_{дин}$ и шероховатости по параметру R_a для «жёстких» режимов резания при постоянной частоте вращения фрезы – $n_{ст} = 1600$ об/мин, глубина резания – $t = 3$ мм. Установлено, что с изменением минутной подачи – S_m наиболее рационально применять упругие демпфирующие элементы, изготовленные из фторопласта, при этом шероховатость по параметру R_a изменяется в 3 раза во всём диапазоне изменения минутной подачи, а при использовании резиновых демпфирующих элементов шероховатость по параметру R_a изменяется в 2 раза (см. рисунок 1а).

Из приведённых графиков можно сделать вывод о том, что изменение шероховатости обработанной поверхности на данных режимах резания происходит в меньшем диапазоне – R_a в сравнении со значениями – R_a , если бы использовалась сборная торцовая фреза без демпфирующих элементов[8]. Если на данных «жёстких» режимах резания уменьшить глу-

бину резания до $t = 1$ мм, тогда эффективность применения резиновых и фторопластовых упругих элементов будет также зависеть от значения минутной подачи S_M , но при этом импульс силы резания от мгновенного приращения толщины срезаемого слоя при обработке «по следу» от предыдущих проходов будет оказывать большее влияние на динамические характеристики процесса резания, так как абсолютное значение силы резания значительно снизится при уменьшении глубины резания с $t = 3$ мм до $t = 1$ мм (см. рисунок 1б).



а)

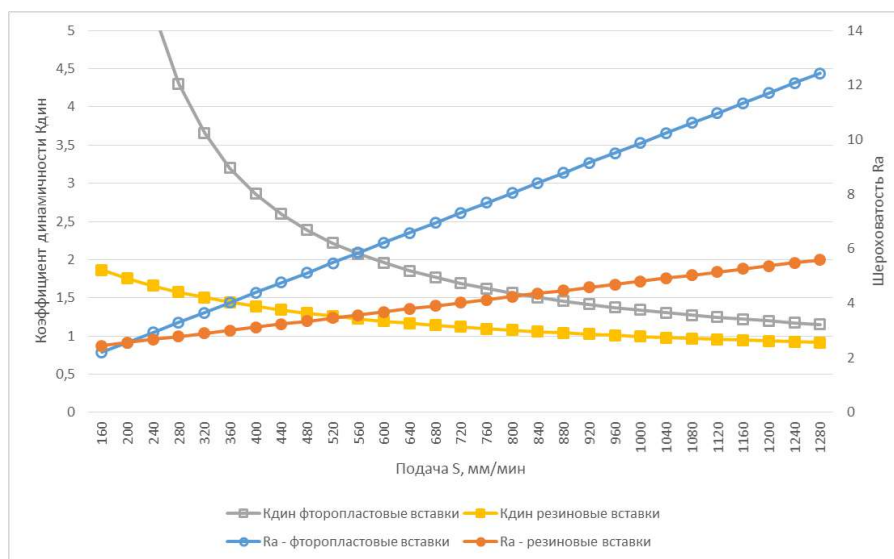


б)

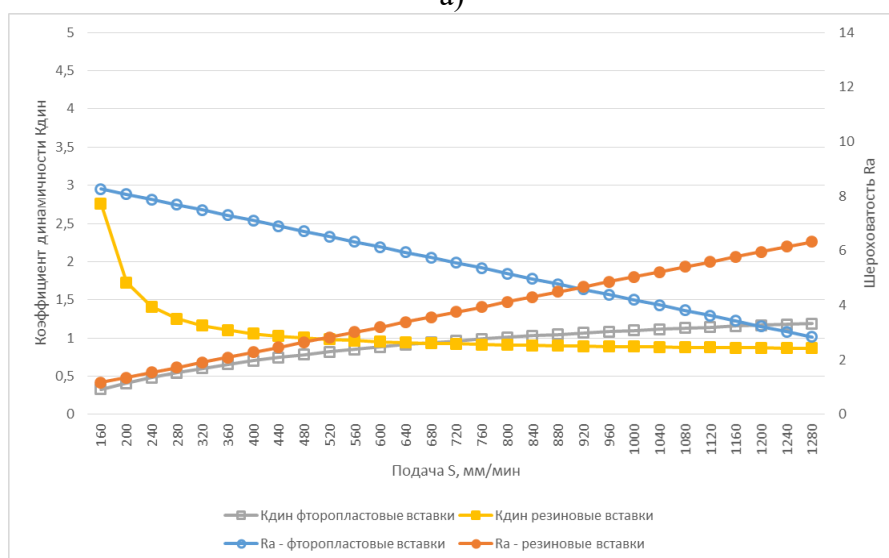
Рисунок 1 – Зависимости коэффициента динамичности по скорости счёта САЭ – $K_{дин}$ и шероховатости по параметру Ra для режимов резания: при постоянной частоте вращения фрезы – $n_{ст} = 1600$ об/мин; минутная подача – $S_M = 160 \dots 1250$ мм/мин; а) глубина резания – $t = 3$ мм; б) глубина резания – $t = 1$ мм.

Резиновые упругие элементы более «чувствительны» к изменению силы резания, поэтому для диапазона изменения минутной подачи S_M от 160 до 440 мм/мин рационально применять резиновые демпфирующие элементы, при изменении минутной подачи S_M от

600 до 1250мм/мин рационально применять фторопластовые демпфирующие элементы. При этом шероховатость обработанной поверхности изменяется незначительно, очевидно, что при данных условиях торцового фрезерования (см. рисунок 1б) происходит изменение условий резания «по следу», так как изменяется доля составляющей профиля шероховатости при лезвийной обработке, определяемая амплитудой колебаний вершины инструмента относительно обрабатываемой поверхности при его прохождении по выступу или впадине исходной шероховатости[9], а также снижается доля приращения мгновенной подачи (толщины срезаемого слоя)[10].



а)



б)

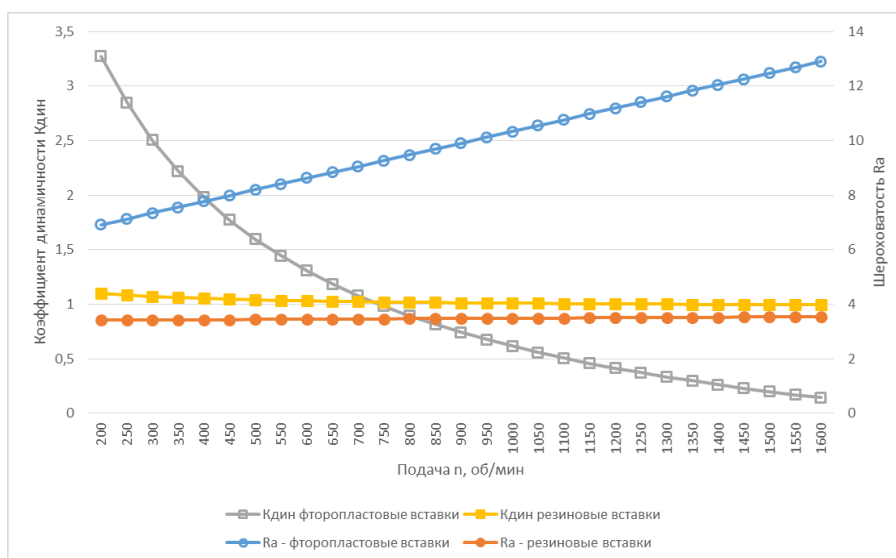
Рисунок 2 – Зависимости коэффициента динамичности по скорости счёта САЭ – $K_{дин}$ и шероховатости по параметру Ra для режимов резания: при постоянной частоте вращения фрезы – $n_{ст} = 1000 \text{ об/мин}$; минутная подача – $S_M = 160 \dots 1250 \text{ мм/мин}$; а) глубина резания – $t = 3 \text{ мм}$; б) глубина резания – $t = 1 \text{ мм}$.

На рисунках 2а, б показаны графики изменения коэффициента динамичности по скорости съёма САЭ – $K_{дин}$ и шероховатости по параметру Ra для «умеренных» режимов резания при постоянной частоте вращения фрезы – $n_{ст} = 1000$ об/мин, глубина резания – $t = 1$ мм и $t = 3$ мм.

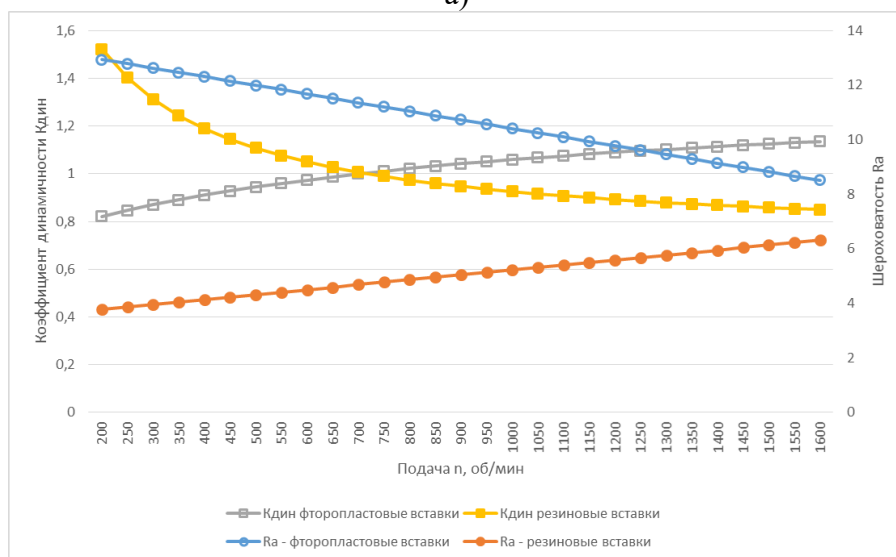
При этом сохранился характер изменения коэффициента динамичности по скорости съёма САЭ – $K_{дин}$ и шероховатости по параметру Ra во всём диапазоне изменения минутной подачи – S_m относительно изменений, характерных для «жестких» режимов резания (см. рисунок 1), однако изменения коэффициента динамичности по скорости съёма САЭ – $K_{дин}$ и шероховатости по параметру Ra для фторопластовых и резиновых демпфирующих элементов имеют несколько больший «размах» во всём диапазоне изменения минутной подачи – S_m (см. рисунок 2а, б).

На рисунках 3а, б показаны графики изменения коэффициента динамичности по скорости съёма САЭ – $K_{дин}$ и шероховатости по параметру Ra для режимов фрезерования при постоянной минутной подаче фрезы – $S_m = 1000$ мм/мин, глубина резания – $t = 1$ мм и $t = 3$ мм. Известно, что с увеличением частоты вращения фрезы происходит значительное приращение силы резания, происходит изменение характера действия упругих демпфирующих элементов сборной торцевой фрезы, изготовленных из резины и фторопласта на процесс виброгашения. Поэтому при глубине резания – $t = 3$ мм для диапазона изменения частоты вращения фрезы – $n_{ст}$ от 200 до 700 об/мин рационально применять фторопластовые демпфирующие элементы, при этом шероховатость поверхности в данном диапазоне частот вращения изменяется незначительно. При изменении частоты вращения фрезы – $n_{ст}$ от 200 до 1400 об/мин – коэффициент динамичности по скорости съёма САЭ – $K_{дин}$ для резиновых демпфирующих элементов имеет постоянное значение – больше единицы в диапазоне от 1,09 до 1,001. При этом шероховатость обработанной поверхности изменяется незначительно, очевидно, что при данных условиях торцевого фрезерования (см. рисунок 3а) происходит изменение условий резания «по следу» [9].

При изменении глубины резания для торцевого фрезерования до значения – $t = 1$ мм и изменении частоты вращения фрезы – $n_{ст}$ в диапазоне от 200 до 1600 об/мин при постоянной минутной подаче – $S_m = 1000$ мм/мин – изменяется характер влияния демпфирующих элементов, изготовленных из резины и фторопласта на изменение коэффициента динамичности по скорости съёма САЭ – $K_{дин}$. Для диапазона изменения частоты вращения фрезы – $n_{ст}$ от 200 до 700 об/мин рационально применять резиновые демпфирующие элементы, а для диапазона изменения частоты вращения фрезы – $n_{ст}$ от 750 до 1600 об/мин рационально применять фторопластовые демпфирующие элементы. При этом шероховатость обработанной поверхности по параметру Ra в данных диапазонах изменения частот вращения фрезы $n_{ст}$ – при использовании резиновых и фторопластовых упругих элементов – изменяется незначительно. (см. рисунок 3б).



а)



б)

Рисунок 3 – Зависимости коэффициента динамичности по скорости съёма САЭ – $K_{дин}$ и шероховатости по параметру Ra для режимов резания: при постоянной минутной подаче – $S_m = 1000$ мм/мин; частота вращения фрезы – $n_{ст} = 200 \dots 1600$ об/мин; а) глубина резания – $t = 3$ мм; б) глубина резания – $t = 1$ мм.

Выводы

Таким образом, коэффициент динамичности по скорости съёма САЭ – $K_{дин}$ является достаточно информативным показателем, который позволяет дать сравнительную оценку эффективности использования различных демпфирующих элементов, установленных в конструкциях сборных металлорежущих инструментов и позволяет прогнозировать значение шероховатости обработанной поверхности при изменениях параметров режима резания.

Список литературы

1. Жарков, И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И. Г. Жарков. – Л.: Машиностроение, 1986. – 184 с. : ил.

2. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев– М., «Высшая школа», 1974. – 587 с.
3. Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение. 1967. – 359 с.
4. Подураев В.Н., Малыгин В.И., Кремлёва Л.В. Динамическая модель элементов технологической системы с учётом кинематической нестабильности процесса резания // Вестник машиностроения. 1996. №6. С. 18 - 23.
5. Прилуцкий В.А. Технологические методы снижения волнистости поверхности. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2012. - 21 см. Т. 1.- 305 с.
6. Татаркин Е.Ю., Кряжев Ю.А., Огневенко Е.С., Кряжев А.Ю., Горин Е.Ю. Определение демпфирующих свойств фрезы новой конструкции Вестник Алтайской науки, №2-1, 2003. С. 33-35.
7. Татаркин Е.Ю., Кряжев Ю.А., Огневенко Е.С. Новые аспекты применения методов акустической эмиссии в машиностроении и металлообработке [Текст]: Монография. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015. - 101 с.
8. Горин Е.Ю., Кряжев А.Ю., Кряжев Ю.А., Татаркин Е.Ю. Экспериментальный метод прогнозирования параметров качества обработанной поверхности при торцовом фрезеровании на станках с ЧПУ //Знания молодых: наука, практика и инновации: Сборник научных трудов XV Международной научно-практической конференции аспирантов и молодых учёных. В 2 ч. Ч.1. Технические и экономические науки. – Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА. 2015. С. 17-21.
9. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
10. Автономова Л.В., Погорелов С.Ю., Прево И.Д., Хавин В.Л. Динамическая модель процессов фрезерования // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Динамика и прочность машин №47, 2008. С. 13 – 18.

THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN ASSEMBLED FACE MILL WITH DAMPING ELEMENTS WHILE WORKING ON CNC MACHINES

Kryazhev J. A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kryazhev57@mail.ru

Gorin E. J., Ph.D. student, e-mail: evgenijgorin@gmail.com

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

Abstract

To solve the problem of increased vibration resistance of the milling process on CNC machines, experimental research of proposed design of an assembled face mill with damping elements made of rubber and fluoroplastic at different cutting modes with a joint assessment of the dynamic coefficient by the count rate of the acoustic emission signal (AES) – K_{din} and roughness parameter – R_a were carried out. The graphs of change of dynamic coefficient by the counting rate of the AES – K_{din} and the roughness by R_a for the researched range of milling modes are plotted.

Keywords: mill, face milling, dynamic coefficient, roughness, counting rate, damping elements.

УДК 621.979.06 : 519.873

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРЕИМУЩЕСТВЕННЫХ ВИДОВ ОТКАЗОВ ПРИ РАБОТЕ КРИВОШИПНЫХ ОБРЕЗНЫХ ПРЕССОВ

*КУТЫШКИН Андрей Валентинович¹, доктор техн. наук, профессор,
e-mail: avk_200761@mail.ru*

*ШАШОК Александр Васильевич², кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: avshashok@yandex.ru*

¹Нижевартовский государственный университет, 628605, Российская Федерация, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, г. Нижневартовск, ул. Ленина, 56

²Рубцовский индустриальный институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И.Ползунова, 658207, Российская Федерация, Алтайский край, г. Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6

Аннотация

Рассматривается использование структурных схем надежности для оценки вероятности безотказной работы кривошипных прессов, широко используемых в различных отраслях машиностроения. Разработана обобщенная структурная схема функционирования кривошипного пресса, которая описывает возникновение типовых видов эксплуатационных отказов. Для оценки вероятностей возникновения этих отказов использовался аппарат параметрической теории надежности. Расчетные оценки вероятности безотказной работы кривошипного обрезающего пресса при горячей обрезке облоя поковки достаточно хорошо согласуются с соответствующими данными, опубликованным в открытой печати.

Ключевые слова: кривошипный пресс, эксплуатационные отказы, структурная схема надежности, вероятность безотказной работы.

Введение

Кривошипные прессы составляют подавляющую часть оборудования, используемого в кузнечно-прессовом производстве различных отраслей машиностроения. На текущий момент накоплен достаточно большой опыт их проектирования, производства и эксплуатации [1-4]. Несмотря на то, что их конструкции и компоновка уже длительный период времени не претерпевают каких-либо существенных изменений, исследования процессов, связанных с функционированием как самих прессов в целом [5], так и их отдельных узлов и деталей [6], по-прежнему вызывает как практический, так и научный интерес. Наряду с этим также актуальными являются и задачи оценки вероятностей отсутствия эксплуатационных отказов кривошипных прессов, как одного из показателей надежности их работы, поскольку данное оборудование является одной из ключевых подсистем, обеспечивающей реализацию широко спектра технологических операций горячей объемной и холодной штамповки. Все виды отказов в работе кривошипных прессов предлагается объединить в следующие основные группы по ряду признаков:

1. По степени воздействия на технологическую систему: полные и параметрические отказы. К полным отказам можно отнести отказы, вызванные поломкой кривошипного вала, зубьев шестерен зубчатой передачи и т.п. Во вторую группу входят отказы, связанные с

ухудшением эксплуатационных характеристик пресса, в частности, износ направляющих ползуна, подшипников скольжения вала и т.п.;

2. По физике явлений, обуславливающих возникновение отказа. В условиях налаженного производства доминирующими являются постепенные отказы, вызванные усталостным механическим разрушением элементов оборудования (кривошипные валы, зубчатые передачи), но имеют место и внезапные отказы, обусловленные возникновением пиковых значений энерго-силовой схемы реализуемой технологической операции, что приводит, например, к заклиниванию пресса.

3. По степени критичности к отказам элементы подсистемы оборудования можно разделить на следующие группы [3,4]: элементы кривошипно-шатунной группы; элементы зубчатой передачи; направляющие элементы ползуна и станины; элементы привода (муфта, тормоз).

К источникам возникновения отказов предлагается отнести следующие группы параметров:

- параметры, характеризующие технологию изготовления деталей и узлов оборудования (металлургические процессы, процессы пластической деформации, механическая обработка, термообработка поверхностей деталей и точность сборки узлов);
- параметры, характеризующие условия эксплуатации оборудования (степень загруженности оборудования по усилию, периодичность ремонта и обслуживания);
- параметры, характеризующие энерго-силовую схему реализуемой технологической операцией (технологическое усилие операции, температурно-скоростной режим обработки заготовки и т.п.).

Описание теоретических или экспериментальных исследований

Оценку вероятности отсутствия отказов при работе кривошипного пресса P_H предлагается осуществлять на основе построения структурной схемы надежности [7] (рисунок 1), состоящей из последовательно и параллельно соединенных элементов, учитывающих наличие функциональных связей между узлами и деталями пресса. Каждый элемент данной схемы характеризует вероятность возникновения возможных отказов в наиболее критичных узлах и деталях рассматриваемого оборудования:

- элемент 1 - превышение удельными давлениями, действующими на направляющих станины и ползуна предельно допустимых значений;
- элемент 2 - разрушение стержня шатуна;
- элемент 3 - потеря устойчивости стержнем шатуна;
- элемент 4 - пластическая деформация и разрушение головок шатуна;
- элемент 5 - усталостное разрушение болтов и пальцев шатуна;
- элементы 6 и 7 - отказы подшипников скольжения кривошипного вала, связанные с потерей несущей способности слоя смазки и чрезмерного износа посадочных поверхностей вала и цапфы;
- элементы 8 и 9 - усталостное разрушение в опасных сечениях кривошипного (эксцентрикового) вала (сечения в областях, сопряжения кривошипа (эксцентрика) с телом вала);
- элемент 10 - пластическое смятие контактных поверхностей зубьев шестерни на кривошипном валу и их усталостное разрушение из-за действия изгибающих моментов в зацеплении;
- элемент 11 - проскальзывание муфты при передаче крутящего момента, необходимого для реализации рассматриваемой технологической операции.

Данная схема построена с учетом того, что эксплуатация оборудования невозможна, если возникает отказ в каком-либо из его узлов/элементов. В соответствии с данной схемой можно записать следующие выражения для определения P_H :

$$P_H = \left(\prod_{i=1}^5 P_i \right) \cdot [1 - (1 - P_6 \cdot P_7)(1 - P_8 \cdot P_9)] \cdot P_{10} \cdot P_{11}; P_{10} = [(P_H)^{-1} + (P_F)^{-1} - 1]^{-1}. \quad (1)$$

Здесь P_i - вероятность отсутствия преимущественных видов отказов в вышеперечисленных узлах и деталях кривошипного пресса при его функционировании: $i=1, \dots, 11$; P_H, P_F - вероятности отсутствия отказов, обусловленных смятием контактных поверхностей зубьев шестерни и их усталостного разрушения соответственно (данная зависимость учитывает коррелированность процессов, происходящих при возникновении этих отказов).

На безотказную работу кривошипных прессов существенное влияние оказывает и вероятность их возможного заклинивания при реализации на этих прессах технологических операций штамповки. Тогда для учета отсутствия возникновения подобной ситуации необходимо вероятность P_H необходимо умножить на вероятность P_{12} , т.е. вероятность отсутствия заклинивания пресса при его эксплуатации.

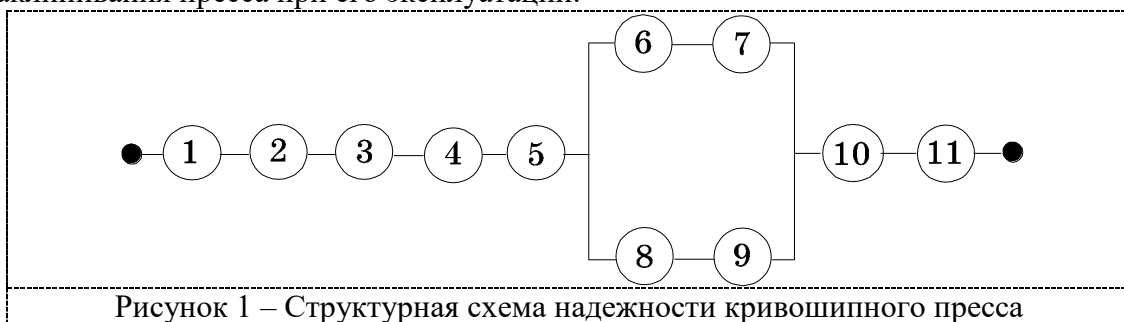


Рисунок 1 – Структурная схема надежности кривошипного пресса

Определение значений величин зависимости (1), осуществляется с использованием разработанных и хорошо себя зарекомендовавших методик, основанных на применении методов параметрической теории надежности [8,9]. Использование данных методов предполагает, что вероятность P_i отсутствия отказа i -ого элемента определяется в зависимости от квантили нормального распределения вероятности u_{P_i} [8,9]:

$$u_{P_i} = -(n_{x_i} - 1) \left(\sqrt{(n_{x_i})^2 v_{x_i}^2 + v_{[x_i]}^2} \right)^{-1}; n_{x_i} = \frac{[x_i]}{\bar{x}_i}; v_{x_i} = \frac{S_{x_i}}{\bar{x}_i}; v_{[x_i]} = \frac{S_{[x_i]}}{[x_i]}. \quad (2)$$

Здесь $S_{x_i}, S_{[x_i]}$ - среднеквадратические отклонения значений i -ого показателя x_i , характеризующего возникновение соответствующего вида отказа элемента/узла оборудования, и соответствующего ему предельно допустимого значения $[x_i]$. \bar{x}_i - среднее значение i -ого показателя.

В общем случае S_{x_i} определяется выражением [8,9]:

$$S_{x_i} = \left(\sum_{l=1}^L \left(\frac{\partial F_i}{\partial x_l} \right)^2 \sigma_{x_l}^2 + \sum_{\substack{l=1, k=1, \\ l \neq k}}^L \left(\frac{\partial F_i}{\partial x_l} \right) \cdot \left(\frac{\partial F_i}{\partial x_k} \right) r_{kl} \cdot \sigma_{x_l} \cdot \sigma_{x_k} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где $\frac{\partial F_i}{\partial x_l}, \frac{\partial F_i}{\partial x_k}$ - частные производные функции $F_i = F_i(x_1, \dots, x_f)$, являющейся информационной моделью, характеризующей образование i -ого отказа по параметрам его источников x_k и x_l при их средних значениях; σ_k, σ_l - среднеквадратические отклонения величин x_k и x_l ;

r_{ki} - коэффициент корреляции; L – общее количество величин, оказывающих наиболее существенное влияние на изменение величины x_i .

Величина $S_{[x_i]}$ оценивается аналогично (3). Вероятность P_{12} также определяется методами параметрической теории надежности (1,2).

Рассмотрим оценку вероятности отсутствия отказов функционирования кривошипного обрезного пресса, используемого на операциях пробивки наметки под отверстие и обрезки облоя поковки, полученной горячей объемной штамповкой в открытых штампах. Преимущественные виды отказов такого оборудования [3,4] приведены в таблице 1, где также представлены критерии и факторы/условия возникновения этих отказов.

Таблица 1 – Преимущественные виды отказов кривошипных обрезных прессов

i	Характеристика и обозначение вероятности отказа обрезного пресса	Критерий отказа $[x_i]$	Фактор отказа \bar{x}_i	Условие возникновения отказа
1	Усталостное разрушение кривошипного вала в опасных сечениях сопряжения кривошипа с телом вала, P_8	Предельно допустимое значение предела выносливости материала кривошипного вала при симметричном цикле нагружения, $[\sigma_{-1}]$	Среднее значение эквивалентного напряжения в опасных сечениях сопряжения кривошипа с телом вала, $\bar{\sigma}_s$	$\bar{\sigma}_s < [\sigma_{-1}]$
2	Износ и разрушение зубчатой передачи обрезного пресса, P_H, P_F .	Предельно допустимые значения: - контактного напряжения, действующего в полюсе зацепления шестерен, $[\sigma_H]$; - контактного напряжения, действующего на переходной поверхности зубчатого колеса, $[\sigma_F]$.	Среднее значение контактного напряжения, действующего в полюсе зацепления шестерен, σ_H . Среднее значение контактного напряжения, действующего на переходной поверхности зубчатого колеса, σ_F .	$\sigma_H < [\sigma_H]$ $\sigma_F < [\sigma_F]$
3	Проскальзывание муфты обрезного пресса, P_{11}	Предельное значение крутящего момента, которое может передать муфта данной конструкции без проскальзывания, $[M]$.	Среднее значение крутящего момента которое может передать муфта данной конструкции, необходимого для реализации операции обрезки облоя, $\bar{M}_{обр}$.	$\bar{M}_{обр} < [M]$
4	Заклинивание пресса при реализации операции обрезки облоя и пробивки наметки под отверстие поковки, P_{12}	Среднее значение полезной энергии маховика (полезная работа пресса), $[A]_{np}$.	Среднее значение работы, затрачиваемой на операцию, $\bar{A}_{обр}$.	$\bar{A}_{обр} < [A]_{np}$

Наиболее критичным к отказам по критерию усталостного разрушения кривошипного вала в опасных сечениях сопряжения кривошипа с телом вала является сечение со стороны зубчатой передачи – элемент 8 (рисунок 1).

С учетом принятых предположений о преимущественных видах отказов рассматриваемого оборудования (таблица 1) значения P_1, \dots, P_7, P_9 (1) принимаются равными 1. Тогда вероятность его безотказной работы P_H с учетом можно оценить выражением:

$$P_H = P_8 \cdot \left[(P_H)^{-1} + (P_F)^{-1} - 1 \right]^{-1} \cdot P_{11} \cdot P_{12}. \quad (4)$$

Источниками возникновения преимущественных видов отказов при работе обрезающего пресса будем считать группы следующих параметров:

- режим нагружения узлов и деталей данного оборудования при реализации операции пробивки наметки под отверстие и обрезки облоя поковки;
- механические свойства материалов, из которых изготовлены наиболее критичные к данным видам отказов детали и узлы пресса.

Основной характеристикой режима нагружения элементов обрезающего пресса, как ключевого источника, вызывающего возникновение выделенных преимущественных видов отказов его узлов, является среднее усилие реализации операции обрезки облоя и пробивки наметки под отверстие поковки \bar{P}_{cp} . Его величина определяется выражением [10]:

$$\bar{P}_{cp} = \lambda Q; Q = (1,1 \dots 1,3) \cdot 1,36 \cdot L \cdot t \cdot \sigma_{\sigma_T}, \quad (5)$$

где σ_{σ_T} - среднее значение предела прочности материала поковки при температуре облоя; \square - коэффициент, характеризующий отношение среднего усилия обрезки облоя \bar{P}_{cp} к максимально возможному значению Q , и равный: холодная обрезка облоя - $\square = 0,4$; горячая обрезка облоя - $\square = 0,6$; L - периметр обрезки облоя или пробиваемой перемычки; t - действительная толщина срезаемого материала поковки.

Для срезаемого облоя поковки $t = t_o = z + n$, а для пробиваемой наметки под отверстие поковки: $t = t_H = z + n + u$. Величина z характеризует размер, который определяется графически с чертежа поковки по линии среза облоя поковки или пробивки наметки под отверстие поковки. Переменная n характеризует возможную недоштамповку по высоте выступающего элемента поковки, примыкающего к облою поковки или наметке под отверстие. Данную величину n можно принять равной положительному допуску на размер этого элемента по высоте. Величина u соответствует среднему значению износа прошивня штампа, который можно принять равным в среднем 2... 5 мм

Для оценки значения $\bar{A}_{обp}$ (таблица 1) используется следующая зависимость [10]:

$$\bar{A}_{обp} = 0,01 \cdot \lambda \cdot Q \cdot t, \quad (6)$$

Наиболее существенное влияние на колебания величины Q и, как следствие, $\bar{A}_{обp}$ оказывают колебания значений величин t и σ_{σ_T} . Тогда среднеквадратическое отклонение $S_{\bar{A}_{обp}}$ значений $\bar{A}_{обp}$ согласно (3) равно:

$$S_{\bar{A}_{обp}} = \left[\left(\frac{\partial \bar{A}_{обp}}{\partial t} \right)^2 \sigma_t^2 + \left(\frac{\partial \bar{A}_{обp}}{\partial \sigma_{\sigma_T}} \right)^2 \cdot S_{\sigma_{\sigma_T}}^2 \right]^{0,5}, \quad (7)$$

где $\sigma_t, S_{\sigma_{\sigma_T}}$ - среднеквадратические отклонения действительной толщины срезаемого облоя (пробиваемой наметки под отверстие) и предела прочности материала поковки при температуре облоя соответственно.

Для практических расчетов можно использовать значения $S_{\sigma_{\text{ст}}}$, приведенные в работе [11]. Значение величины σ_i предлагается определять следующими выражениями: для облоя поковки - $\sigma_i = \sigma_H$; для наметки под отверстие поковки - $\sigma_i^2 = \sigma_H^2 + \sigma_u^2$. Среднеквадратическое отклонение значения высоты элемента поковки σ_H , примыкающего к облою поковки или наметки под отверстие, характеризуется зависимостью: $\sigma_H = \frac{\Delta_H}{6}$, где Δ_H - суммарное поле допуска, назначенного на высоту выступающего элемента поковки. Величину σ_u , в первом приближении, можно оценить выражением $\sigma_u = (0,05...0,1) \cdot \bar{R}$, где \bar{R} - средний радиус скругления кромки прошивня штампа. Величина $\bar{M}_{\text{обр}}$ (таблица 1) также зависит от колебаний значений усилия $\bar{P}_{\text{ср}}$, которое необходимо для реализации рассматриваемой операции и, следовательно, среднеквадратическое отклонение значений $\bar{M}_{\text{обр}}$ определяется зависимостью аналогичной (7). Влияние источников отказов из второй группы, т.е. механических свойств материалов, из которых изготовлены наиболее критичные к отказам детали и узлы прессы, учитывается при оценке значений величин $\bar{\sigma}_s$, σ_H , \square_F (Таблица 1) и соответствующих им среднеквадратических отклонений, которая осуществлялась по методикам работ [1,8,10,12]. Из-за ограничений по объему в данной работе приводятся только значения указанных величин и соответствующие коэффициенты вариации (таблица 2).

Таблица 2 – Вероятности отсутствия преимущественных видов отказов обрезающего прессы при реализации рассматриваемой операции пробивки наметки под отверстие и обрезки облоя поковки в течение одной смены (8 часов).

Фактор отказа \bar{x}_i	v_{x_i}	Критерий отказа $[x_i]$	$v_{[x_i]}$	Квантиль u_{P_i} (2)	Вероятность отсутствия отказа
$\bar{\sigma}_{-1} \cong 279,92$ МПа	0,1175	$\bar{\sigma}_s \cong 229,82$ МПа	0,2	$u_P = -3,389$	$P_{12} = 0,9996$
$\bar{\sigma}_H \cong 457,89$ МПа	0,1208	$[\square_H] \cong 854,14$ МПа	0,0848	$u_P = -4,99$	$P_H = 0,9999$
$\bar{\sigma}_F \cong 298,11$ МПа	0,1486	$[\square_F] \cong 488,7$ МПа	0,0848	$u_P = -3,16$	$P_F = 0,9993$
$\bar{M}_{\text{обр}} \cong 0,052$ МНм	0,2267	$[M] \cong 0,0241$ МНм	0,141	$u_P = -3,264$	$P_{11} = 0,9989$
$\bar{A}_{\text{обр}} \cong 0,12$ МНм	0,1552	$[A]_{\text{пр}} \cong 0,338$ МНм	0,1011	$u_P = -5,16$	$P_{13} = 0,9999$

Оценка вероятности безотказной работы обрезающего прессы при обрезке облоя поковки типа «тело вращения»

Оценим вероятности отсутствия преимущественных видов отказов функционирования обрезающего прессы при обрезке облоя и пробивке наметки под отверстие поковки при следующих исходных данных. Толщина облоя поковки в среднем составляет $t_O = 0,0045$ м; толщина наметки поковки под отверстие - $t_H = 0,058$ м; радиус среза наметки поковки под отверстие $R_H = 0,053$ м; периметр среза наметки под отверстие $\bar{L} \approx 0,333$ м; средняя высота элементов поковки, примыкающих к облою - $h_O = 29,4$ мм и перемычке под отверстие - $h_H = 18,4$ мм; суммарное поле допуска Δ_{h_O} : на элемент, примыкающий к облою $\Delta_{h_O} = 3$ мм, а на элемент, примыкающий к перемычке под отверстие $\Delta_{h_H} = 2,4$ мм; радиус скругления прошивня штампа $\bar{R} = 16$ мм. Средняя температура облоя и наметки под отверстие поковки в зоне среза принимается равной 900°C [10,11]; предел прочности материала поковки в зоне

среза облоя и пробивки наметки под отверстие по данным работы [10] $\sigma_{\text{от}} = 110$ МПа. Обрезка облоя и пробивка наметки под отверстие поковки осуществляется на кривошипном прессе усилием 630 КН. Наибольшим из усилий обрезки облоя и пробивки наметки под отверстие является последнее: $P_{\text{пр}} = 5,326$ МН (5). Именно по этому параметру проводился расчет величин $\bar{\sigma}_H$, $\bar{\sigma}_F$, $\bar{M}_{\text{обр}}$, $\bar{A}_{\text{обр}}$. Расчетные значения этих величин приведены в таблице 2. В этой таблице приведены расчетные предельно допустимые значения этих величин, т.е. критерии отказов (таблица 1). Коэффициенты вариации ν_x для $i = 3,4$ (Таблицы 1,2), рассчитывались согласно (2). Соответствующие среднеквадратические отклонения S_x определялись в соответствии с (1,7). Расчет коэффициентов вариации ν_x для $i = 1,2$ осуществлялся по методикам работ [1,8,12].

Согласно (4) с учетом значений вероятностей отсутствия преимущественных видов отказов обрезного пресса на рассматриваемой операции (Таблица 2) получаем комплексную оценку надежности функционирования данного оборудования: $P_H = 0,9987$.

Выводы

Общая концепция формирования структурных схем надежности технических систем позволила разработать обобщенную структурную схему надежности функционирования одного из самых распространенных видов оборудования обработки металлов давлением – кривошипного пресса. Предложенная структурная схема надежности учитывает возникновение типовых отказов деталей и узлов кривошипного пресса при их использовании для реализации различных технологических процессов объемной и листовой штамповки. Проведенная оценка вероятности безотказной работы кривошипного обрезного пресса на операции горячей пробивки наметки под отверстие и обрезки облоя поковки достаточно хорошо согласуется с производственными данными по безотказной работе этого типа оборудования, опубликованными в открытой печати [3,4].

Список литературы

1. Ланской Е.И., Банкетов А.Н. Элементы расчета деталей и узлов кривошипных пресов. – М.: Машиностроение. 1966. – 376 с.
2. Кривошипные горячештамповочные прессы в современном кузнечно-штамповочном производстве./ Гурьев Ю.Т., Горожанкин В.Н., Крук А.Т., Плюгачев В.Г., Гончаров А.И. – М.: НИИМАШ. 1983. – 78 с.
3. Потапов В.А. Основные причины отказов и остановок оборудования для листовой и горячей объемной штамповки, Кузнечно-штамповочное производство. 1996. № 9. – С.41 – 42.
4. Нистратов А.Ф. Анализ и классификация аварийных случаев поломок деталей кривошипных пресов, Кузнечно-штамповочное производство. 1964. № 8. – С. 31 – 36.
5. Телегин И.В. Компьютерное моделирование динамических процессов в кривошипном горячештамповочном прессе// Фундаментальные исследования. Технические науки. 2013. № 10. – С. 3414 – 3418.
6. Кобзев К. О. Повышение стабильности функционирования рабочего органа в кривошипных прессах // Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19. № 4. – С. 374 – 381.

7. ГОСТ Р 51901.14 — 2005 (МЭК 61078:1991) Метод структурной схемы надежности (IEC 61078:1991 Analysis techniques for dependability — Reliability block diagram method (MOD)). М.: СтандартИнформ. 2005. – 22 с.

8. Надежность машин: Учебное пособие для машиностр. специальностей вузов/Д.Н.Решетов, А.С.Иванов, В.З.Фадеев: Под. ред. Д. Н. Решетова. – М.: Высшая школа. 1988. – 238 с.

9. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. стандартов. 1989. – 224 с.

10. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т./Ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1986 – Т.2. Горячая штамповка/ Под ред. И.Е.Семенова. 1986. – 592 с.

11. Кутышкин А.В. Вероятностная оценка возникновения дефектов при обрезке облоя и пробивки перемычки осесимметричных поковок// Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2001. № 9. – С. 7 – 11.

12. Расчет на прочность деталей машин: Справочник/ И.А.Биргер, Б.Ф.Шор, Г.Б. Иоселиевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. 1993. – 640 с.

A PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE OCCURRENCE OF PRIMARY TYPES OF FAILURES WHEN OPERATING OF THE CRANK PRESSES FOR DEFLASHING FORGING

Kutyshkin A.V., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: avk_200761@mail.ru

Shashok A.V., C. Sc. (Engineering), Docent, e – mail: avshashok@yandex.ru

Nizhnevartovsk State University, 628605, Lenina str., 56, Nizhnevartovsk, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra, Russian Federation

Rubtsovsk Industrial Institute (branch) Polzunov Altai State Technical University, 658207, Tractor st., 2/6, Rubtsovsk, Altai region, Russian Federation

Abstract

The use of structural reliability diagrams for assessing the probability of failure-free operation of crank presses, widely used in various branches of mechanical engineering, is considered. A generalized structural diagram of the reliability of the operation of a crank press has been developed, which describes the occurrence of typical types of operational failures. To assess the probabilities of these failures, the apparatus of the parametric theory of reliability was used. Calculated estimates of the probability of failure-free operation of the trimming crank press during hot trimming of the forging flash are in good agreement with the corresponding data published in the open press.

Keywords: crank press, operational failures, structural diagram of reliability, probability of failure-free operation

УДК 621.9: 621.91.01: 621.9.025

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ НА ВЕЛИЧИНУ УПРУГИХ ОТЖАТИЙ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ СТАЛИ 12Х18Н10Т

*ВЕРЕЩАГИН Владислав Юрьевич¹,
e-mail: Kliricky@yandex.ru*

*ВЕРЕЩАГИНА Александра Сергеевна², кандидат технических наук,
e-mail: vereshhagina@corp.nstu.ru*

¹Новосибирский государственный педагогический университет, 630126,
Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Вилюйская, д. 28

²Новосибирский государственный технический университет, 630073, Российская Федерация,
г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20

Аннотация

Статья посвящена исследованию величины упругих отжатию концевой фрезы при контурном фрезеровании от ширины фрезерования, вылета фрезы и ее конструкции. Проведено сравнение величин упругих отжатию для концевых фрез различного исполнения: со сменными режущими головками фирм Sandvik и Mitsubishi, паяными, цельными.

В статье описываются результаты экспериментальных исследований по определению величин упругих отжатию в процессе обработки уступов для различной ширины фрезерования при обработке стали 12Х18Н10Т твердосплавными цельными и составными фрезами.

Ключевые слова: фрезерование, концевая твердосплавная фреза, составная фреза Sandvik и Mitsubishi, упругие деформации, экспериментальное исследование.

Введение

В современном машиностроительном производстве применяется широкая номенклатура режущего инструмента. Особенно это хорошо прослеживается на производстве, где применяются высокопроизводительные обрабатывающие центры (высокоскоростные станки с ЧПУ). Например, для операции обработки кармана при фрезеровании выбор режущего инструмента может быть выполнен из большого разнообразия фрез, различающихся как по конструктивному исполнению (сборные, монолитные), по инструментальному материалу, так и по производителям.

При выборе режущего инструмента важно обеспечение точностных характеристик изготавливаемых изделий при соблюдении необходимой производительности и себестоимости. Применение монолитных твердосплавных концевых фрез позволяет решить задачу обеспечения точности, но их высокая стоимость и частые отказы по разным причинам (рисунок 1) вынуждает производителей режущего инструмента искать выход из сложившейся ситуации. Одним из возможных вариантов решения проблемы является применение концевых фрез со сменными режущими головками, у которых хвостовик твердосплавный (многоцветный), в который по специальной резьбе вкручивается режущая головка, геометрия которой зависит от требований к обрабатываемой поверхности. Такая конструкция позволяет быстро восстанавливать работоспособность фрезы после износа или разрушения режущих кромок. На рынке режущего инструмента представлено большое разнообразие концевых фрез со сменными режущими головками. Ведущими производителями таких фрез являются: фирма

Sandvik с их линейкой фрез CoroMill 316 [1] (рисунок 2) и Mitsubishi с линейкой фрез iMX [4] (рисунок 3). Другим конструктивным решением является использование составных концевых фрез, хвостовик которых выполнен из более дешевого материала, а соединение режущей части и хвостовика происходит по средством пайки [2, 3, 5]. Однако применение концевых фрез на основе того или иного конструктивного решения требует проверки обеспечения точностных характеристик обрабатываемой поверхности.

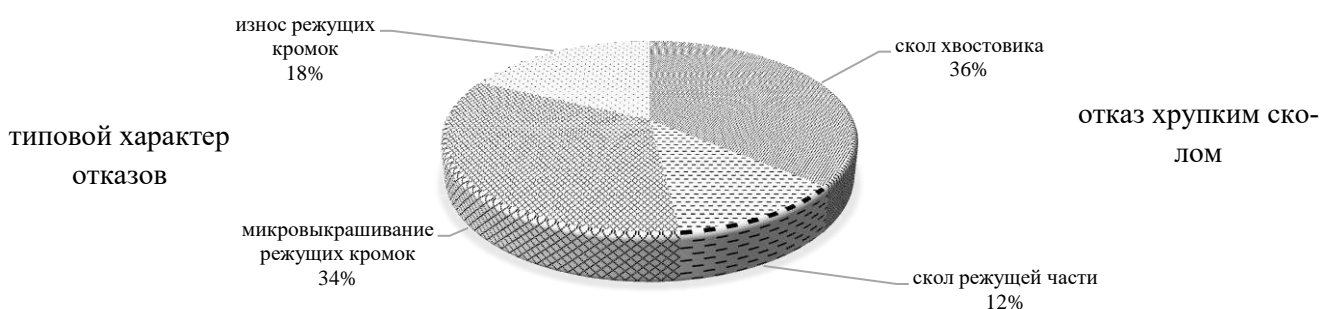


Рисунок 1 – Статистика отказов монолитных фрез



Рисунок 2 – Внешний вид составной фрезы CoroMill 316



Рисунок 3 – Внешний вид составной фрезы Mitsubishi

Такая низкая надёжность монолитных фрез ставит задачу поиска более рациональных вариантов конструкции концевых фрез.

Вопросами повышения работоспособности концевых фрез занимались многие отечественные и зарубежные исследователи, например, Owen S. J., Staten M. L., Armarego E. J., Brecher C., Canann S. A., Fischer F. D., Grzesik W., Klocke F., Ivester R. W., Shivpuri R., Hua J., Mittal P., Srivastava A. K., Ruppert J. A., Артамонов Е.В., Астафьев В. И., Бобров В.Ф., Сидельников А.И., Волчков В.М., Козлов А.А., Кузин П.В. Залого В. А., Калиткин, Н. Н., Клушин М.И., Корчагин А., Криворучко Д.В., Марков А.И., Нарыжный А. Г., Мазур Н.П., Внуков Ю.Н., Остафьев В. А., Полетика М.Ф., Пономарёв Б.Б., Резников А. Н., Рыжкин А.А., Талантов Н.В., Безъязычный В.Ф., Балла О.М., Верещака А.А., Григорьев С.Н., Евсеев Д.Г. и др. Однако полученные ими результаты не исчерпали растущие требования современного машиностроения. Требуется разработка рекомендаций по применению концевых фрез различного конструктивного исполнения для обеспечения необходимой точности обработки при должном уровне производительности и себестоимости.

Методология исследования

Параметром для оценки точности обработки фрезами различной конструкции принята величина отклонения $y_{отк}$ стенки паза из условия – чем меньше величина отклонения, тем выше точность обработки. При фрезеровании погрешность обработки возникает за счет деформирования корпуса фрезы от силы P_y . Расчётная схема деформации корпуса фрезы представлена на рисунке 4.

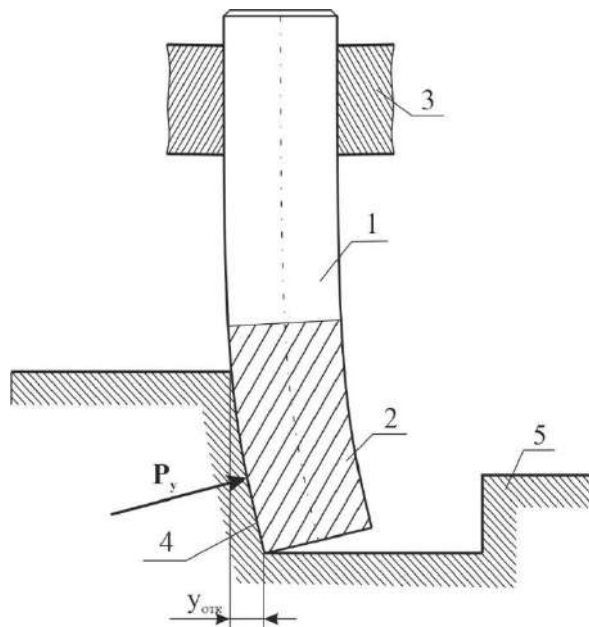


Рисунок 4 – Схема образования отклонения $y_{отк}$ от вертикали положения стенки обрабатываемого паза при действии радиальной составляющей P_y силы резания: 1 – хвостовик фрезы; 2 – режущая часть фрезы; 3 – зажимное устройство станка; 4 – обработанная поверхность паза заготовки 5

Радиальная составляющая силы резания P_y может быть определена как часть от P_z

$$P_y = 0,85 \cdot P_z,$$

где P_z – окружная сила резания [6], значение которой зависит от глубины и ширины фрезерования, подачи на зуб, параметров фрезы, а также коэффициентов, зависящих от свойств обрабатываемого и инструментального материалов.

Расчет радиальной силы резания производился для режимов резания, приведенным в таблице 1 для ширины фрезерования $B = 5$ мм и $B = 40$ мм. В результате вычислений получены силы резания: $P_y = 1427$ Н и $P_y = 1639$ Н соответственно.

Планирование эксперимента

Для определения погрешности обработки при фрезеровании концевыми фрезами (монокристаллическими и составными), возникающей за счет деформирования корпуса фрезы, были проведены исследования на нахождение величин отжатия режущего инструмента.

Эксперименты проводились при фрезерной обработке на станке с ЧПУ марки DMC 635V. Для уменьшения биения, возникающих в процессе обработки, фреза устанавливалась в гидропатрон (рисунок 5).



Рисунок 5 – Фреза в гидropатроне

При проведении экспериментов применялся инструмент: фрезы твёрдосплавные из сплава ВК8 и составные фрезы, хвостовик которых изготовлен из стали 40Х, а режущая часть выполнена из твердого сплава ВК8, сборные концевые фрезы со сменными режущими головками фирм Sandvik и Mitsubishi. Диаметр фрез составлял 16 мм, а длина 92 – 123 мм. Схема фрезерования представлена на рисунке 6.

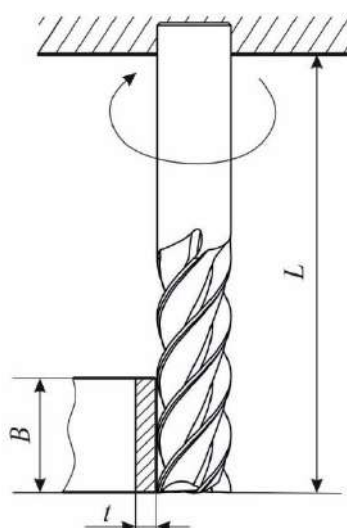


Рисунок 6 – Схема фрезерования

B – ширина фрезерования; t – глубина фрезерования; L – вылет фрезы

В ходе экспериментов варьировались значения: B – ширины фрезерования, t – глубины фрезерования, L – вылет фрезы, а также режимы резания в зависимости от обрабатываемого материала. В качестве образцов использовались заготовки кубической формы с размерами $70 \times 70 \times 70$ мм, изготовленные из стали 12Х18Н10Т. Режимы резания и варьируемые параметры сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Режимы резания

серия экспериментов	обрабатываемый материал	вылет фрезы L (длина), мм	ширина фрезерования, мм	глубина фрезерования, мм	Частота вращения, об/мин	Подача S_z , мм/зуб
1-3	12Х18Н10Т	70	15	0,5	1000	0,02
4-6	12Х18Н10Т	110	40	0,5	1000	0,01

В качестве параметра, характеризующего величину отжатия режущего инструмента, было принято отклонение от перпендикулярности обработанной поверхности относительно

базовой плоскости основания.

Проведение измерений

Измерение отклонения от перпендикулярности плоскостей (что соответствует иско-мой величине $u_{отк}$) проводилось по схеме на рисунке 7.

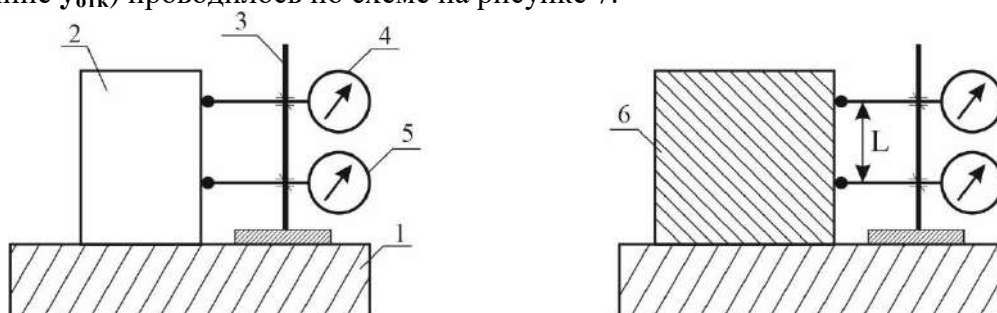


Рисунок 7 – Схема измерения отклонения от перпендикулярности плоскостей
1 - установочное приспособление, 2 – угловая мера, 3 – штатив, 4,5 – измерительные головки, 6 - контролируемая деталь

Результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения отклонения при обработке уступов стали 12X18H10T

вид фрезы	вылет (длина) фрезы, мм	ширина фрезерования, мм	значение отклонения, мкм		
			серия 1	серия 2	серия 3
цельная	70	15	3,1	3,7	3,4
составная (паянная)			5,5	5,3	5,8
сборные Sandvik			4,8	5,5	5,1
сборная Mitsubishi			5,0	5,8	5,6
цельная	110		5,8	6,3	6,0
составная (паянная)			7,1	7,4	8,2
сборные Sandvik			6,3	6,8	6,1
сборная Mitsubishi			8,0	7,5	7,3
			серия 4	серия 5	серия 6
цельная	70	40	13	15	14
составная (паянная)			15	16	15
сборные Sandvik			16	20	21
сборная Mitsubishi			23	21	28
цельная	110		23	22	22
составная (паянная)			27	23	25
сборные Sandvik			28	25	30
сборная Mitsubishi			32	37	31

Выводы

Анализ данных таблицы 2 позволяет сделать следующие выводы.

1. Сборные фрезы со сменными режущими головками во всех рассмотренных параметрах (длина от 92 мм до 110 мм, длина режущей части 40 мм, диаметр 16 мм) применимы на предприятиях общего машиностроения. Погрешность $y_{отк}$ составляет от 4,8 мкм до 37 мкм.
2. Чем меньше длина фрезы, тем выше точность изготовления стенки паза (тем меньше величина $y_{отк}$) детали не зависимо от конструкции фрезы.
3. При длине сборных фрез 92 мм (вылет 70 мм) их точность не уступает точности, получаемой при применении монолитной фрезы. Следовательно фрезы длиной 92 мм можно использовать в том числе для изготовления высокоточных деталей (погрешность $y_{отк}$ составляет от 2 мкм до 9 мкм).
4. При длине сборных фрез выше 123 мм особенно при обработки большой ширины фрезерования $B > 40$ мм они конкурируют с составными фрезами (паянными) и могут быть использованы при изготовлении деталей общего машиностроения.

Список литературы

1. Sandvik Coromant, Основной каталог, 2020
2. Верещагин В.Ю. Анализ результатов испытаний составных концевых фрез/ В.Ю. Верещагин, Б.Я Мокрицкий, А.С. Верещагина // «Ученые записки КНАГТУ» — № 3 (27). – 2016. – С. 53 – 56.
3. Верещагин В.Ю. Моделирование как инструментарий оптимизации составной концевой фрезы / Б.Я. Мокрицкий, В.Ю. Верещагин, А.С. Верещагина, Я.В. Конюхова // Металлообработка 2017. № 6 (102). С. 54-60.
4. Каталог MITSUBISHI 2017 Новинки станочного металлорежущего инструмента 250 с.
5. Мокрицкий Б.Я. Составные твердосплавные концевые фрезы как альтернатива цельным и сборным твердосплавным концевым фрезам / Б.Я Мокрицкий, В.Ю. Верещагин, Е.Б. Мокрицкая, С.А. Пячин, С.В. Белых, А.С. Верещагина // СТИН - №6. – 2016. – С. 7 – 10
6. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. С74 Т. 2/Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1986. 496 с, ил.

THE INFLUENCE OF THE DESIGN OF END MILLS ON THE AMOUNT OF ELASTIC SQUEEZES WHEN MILLING STEEL 12X18N10T

Vereshchagin V. Y., - senior teacher. (Engineering), e – mail: klirickv@yandex.ru

Vereshchagina A.S., Cand. tech. Sciences, Associate Professor,
e – mail: vereshhagina@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Pedagogical University, 630126, Vilyuyskaya st., 28, Novosibirsk.
Novosibirsk State Technical University, 630087, K. Marks prospect, 20, Novosibirsk

Abstract

The article is devoted to the study of the value of elastic squeezes of the end mill during contour milling from the milling width, the departure of the cutter and its design. The comparison of the values of elastic squeezes for end mills of various designs is carried out: with replaceable cutting heads from Sandvik and Mitsubishi, soldered, one-piece. The article describes the results of experimental studies to determine the values of elastic squeezes during the processing of ledges for different milling widths when processing 12X18N10T steel with solid-alloy solid and composite cutters.

Keywords: milling, end carbide milling cutter, Sandvik and Mitsubishi composite milling cutter, elastic deformations, experimental study

УДК 621.438

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОБИЛЬНОЙ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ НА БАЗЕ ЛАЗЕРНОГО ТРЕКЕРА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СТЕНДА ПЕРЕД ИСПЫТАНИЯМИ

*ЕРОШКОВ В.Ю., канд. техн. наук,
e – mail: eroschkow@mail.ru*

Публичное акционерное общество «ОДК-Сатурн»,
152903, Ярославская обл., г. Рыбинск, пр-т. Ленина, д. 163

Аннотация

Рассмотрен процесс использования мобильного контрольно-измерительного комплекса на базе лазерного трекера при аттестации измерительного оборудования и для контроля размеров изделия на стенде газотурбинных агрегатов. Использование аттестованных координатно-измерительных систем с дистанционной системой определения расстояний позволяет эффективно решить вопрос оценки точности сборки и монтажа газотурбинного агрегата перед его испытаниями и подтвердить достоверность результатов измерения основных эксплуатационных параметров изделия стендовым оборудованием.

Ключевые слова: испытания, координатно-измерительные системы, лазерный трекер, газотурбинный агрегат, методика, калибровка, аттестация.

Введение

При подготовке к испытанию газотурбинных агрегатов различного назначения, монтажу изделия и аттестации измерительного оборудования стенда возникает ряд технических и организационных вопросов, связанных с освоением новых технологий, технологического и измерительного оборудования, аттестацией методик и измерительных систем в Государственной системе обеспечения единства измерений. Практика предприятий авиадвигателестроения показала, что для решения указанных вопросов может успешно использоваться современное оборудование на основе технологий лазерного измерения размеров и координат, например система лазерной центровки валов OPTALIGN Smart, используемая при монтаже морских газотурбинных агрегатов на испытательном стенде [1]. Существуют и другие системы, в частности настоящая публикация посвящена вопросам использования мобильной координатно-измерительной машины (КИМ) на базе лазерного трекера FARO Laser Tracker VANTAGE, которая аттестована в РФ и имеет соответствующий сертификат типа. Сертификат данной КИМ в соответствии с требованиями нормативной и технической документации РФ позволяет использовать ее для проведения аттестации, поверки или калибровки испытательного оборудования и стендов.

Описание технических решений и анализ возможностей использования оборудования

КИМ предназначены для измерений координат с целью определения геометрических размеров и формы поверхностей объектов сложной формы. Среди данного оборудования выделяются лазерные трекеры, несмотря на новизну, имеющие широкие области применения и поставку от надежных серийных производителей [2].

Рассматриваемая далее система FARO Laser Tracker Vantage (лазерный трекер) специально разработана для высокоточного измерения крупногабаритных объектов до 160 м (с одной установки). Основными компонентами системы являются измерительная головка Laser Tracker, главный управляющий модуль, световозвращающую мишень, представляющую собой сферу определенного размера и управляющий компьютер с программным обеспечением CAM2 (рис.1).



Рисунок 1 – Лазерный трекер FARO

Принцип работы Laser Tracker Vantage заключается в отражении лазерного луча от небольшого зеркального призматического отражателя, помещенного внутрь сферы – световозвращающей мишени (рис. 2). Лазерный трекер измеряет расстояние до отражателя, угол азимута и высоты, и с помощью программного обеспечения определяет координаты отражателя в пространстве в реальный момент времени относительно предварительно заданной системы координат.

В корпусе измерительной головки лазерного трекера размещены прецизионный лазерный дальномер, преобразователи, датчики давления и влажности, сервоприводы, угловые устройства, поворотное зеркало и две ортогональные оси вращения. Точка пересечения осей вращения локализуется в точке на отражающей поверхности поворотного зеркала. Лазерный дальномер позволяет определить координаты (положение в пространстве по отношению к трекеру) отражателя в любой момент времени, т.е. при прерывании луча нет необходимости возвращать отражатель в "нулевое" положение, достаточно лишь "поймать" лазерный луч отражателем и продолжить прерванные измерения. Лазерный дальномер позволяет в режиме абсолютного измерения дистанции снимать 1000 точек в секунду, что позволяет использовать данный режим для динамических измерений.

Поиск «потерянных» отражателей с учетом расстояния отражателя к трекеру упрощает наличие стереокамеры. При помощи встроенной видеокамеры оператор имеет возмож-

ность визуально наблюдать на экране компьютера измеряемую область, выбирать области и точки измерений с использованием системы автоматического проектирования CAD.



Рисунок 2 – Принцип работы лазерного трекера FARO:

1 – включение измерительной головки, 2 – юстировка оборудования (определение базы); 3 – идентификация мишени; 4 – проверка работы измерительной головки (поворота головки, слежения за мишенью); 5 – определение координаты на поверхности детали; 6 – отображение результатов измерения на мониторе

Вращение вокруг осей осуществляется с помощью двигателей постоянного тока, каждая ось снабжена угломерным кодирующим устройством (TriMAP энкодером). Сервоприводы позволяют через поворотное зеркало наводить лазерные лучи дальномера на отражатель, а также отслеживать перемещения отражателя, при этом измеряются углы поворота зеркала и их изменения. Выносные датчики температуры и влажности воздуха производят мониторинг окружающей среды и автоматически вносят компенсацию в виде поправок в результаты измерений.

Система работает со стандартным программным обеспечением, которое позволяет измерять, сканировать, анализировать и получать отчет о трехмерных геометрических параметрах детали. В процессе работы на дисплей компьютера может выводиться трехмерная CAD модель, положение отражателя в реальный момент времени, расположение измеряемых точек и величины отклонений их расположения от заданных величин. Для измерения деталей, не имеющих реальных геометрических баз (отверстия, пазы и т.п.), FARO имеет режим итеративной привязки, который позволяет совмещать детали и модели по точкам, выбранным на реальной модели и последующей оптимизации методом последовательных приближений. Программное обеспечение FARO Laser Tracker VANTAGE позволяет производить измерения деталей, создавать системы координат на базе имеющихся данных, применять допуски, также строить графические отчеты. Возможности системы: диапазон измерений длины – от 0 до 80 м (в зависимости от размера объекта и точности измерения), пределы допускаемой абсолютной погрешности при измерении длины $\pm (8 \text{ мкм} + 0,4 \text{ мкм/м})$; Пределы допускаемой абсолютной погрешности при измерении углов $\pm (10 \text{ мкм} + 2,5 \text{ мкм/м})$.

Согласно требований существующей нормативной документации в отрасли газотурбостроения, перед испытаниями изделий на стендах морских газотурбинных агрегатов необходимо выполнять калибровку измерительных систем. При аттестации системы измерения крутящего момента на испытательном стенде, основанной на гидравлическом динамометре – нагрузочном устройстве (ГД) с рычажно - нагрузочной системой калибровки датчика силы, актуальной задачей является определение размеров передаточных устройств (рычагов) с точностью до 0,01 мм (рис. 3).

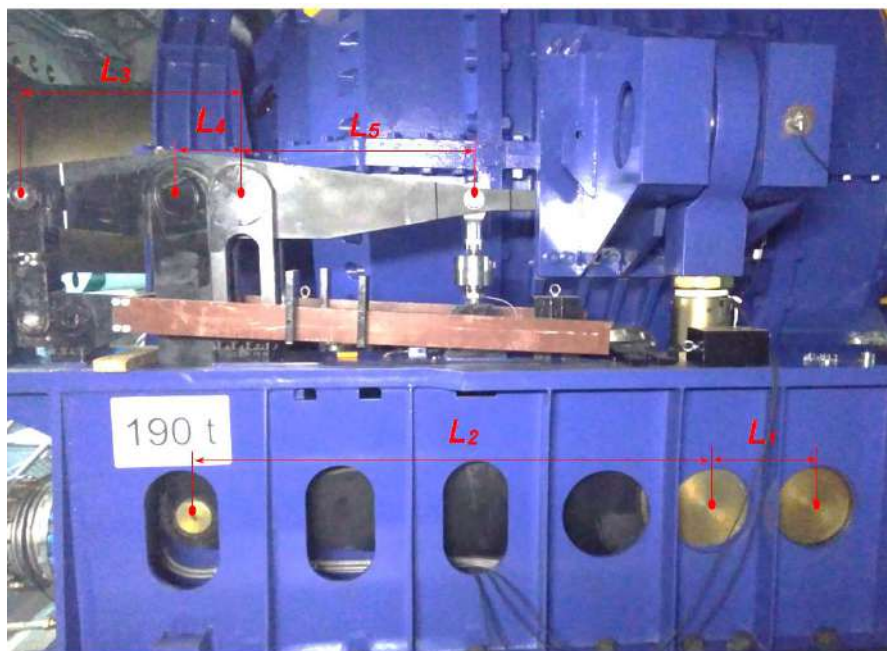


Рисунок 3 – Измерения длин плеч передаточных рычагов силоизмерительной системы гидравлического динамометра

С учетом габаритов оборудования (более 6 м), пространственного расположения измеряемых деталей, отсутствия явных баз, осей и ограниченного доступа к поверхностям – сложно представить каким другим методом, кроме как координатным измерением можно решить данную задачу.

Отметим, что попытки использования стандартных средств измерения (СИ) типа скоб, линеек, и даже лазерного дальномера – не привели к желаемому результату. Накопленные погрешности и трудоемкость косвенных методов измерений, основанных на определении размеров одних поверхностей, и пересчете их в измерительные базы для других – не позволили даже в процессе предварительной проработки получить желаемый результат с необходимой точностью. На практике, так как измеряемые поверхности не были открыты со всех сторон, стандартные СИ было очень неудобно настраивать и выполнять измерения; измерения давали большую погрешность даже из-за неправильного расположения контактных поверхностей СИ и деталей: под углом к поверхности, с боку и т.п. Возникла проблема и визуализации результатов, например, чтобы посмотреть на шкалу рычажной скобы приходилось использовать маленький фотоаппарат: заводить его в нужное место и фотографировать результат, или использовать зеркало на выдвижной рукоятке. При использовании методики измерения длин плеч передаточных рычагов силоизмерительной системы гидравлического

динамометра с помощью КИМ на базе лазерного трекера стало возможным уйти от этих трудностей.

Реализация рассмотренных технологий в производстве морских газотурбинных агрегатов

Кратко рассмотрим процедуру измерения размеров стандового оборудования лазерным трекером, построения плоскостей и осей. Данная процедура занимает даже на таком достаточно габаритном устройстве, каким является ГД, не более часа. Для построения плоскостей и определения координат используется программа Metrolog X4 (входит в состав программного обеспечения FARO).

На первом этапе определяются геометрические (исходные) базы объекта (рис. 4), а именно координаты центра наружного фланца вала ГД.

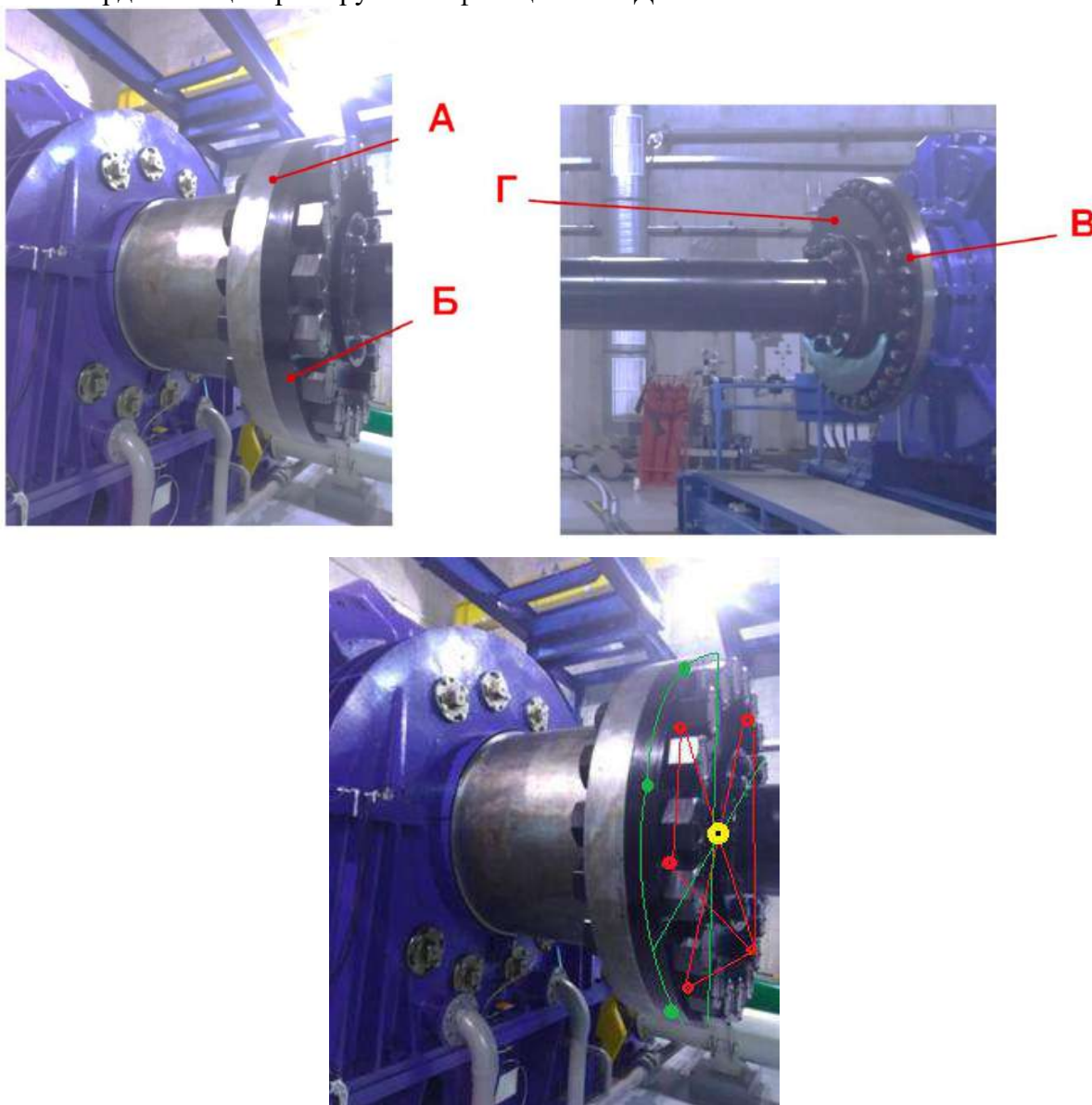


Рисунок 4 – Определение исходных баз для построения оси ГД

С этой целью в 5-ти точках (достаточно и 3, но для повышения точности используют 5 и более, программа их усреднит) определяют координаты торца фланца ГД равномерно по окружности на поверхности Б между или рядом с гайками, соединяющими фланцы, строят плоскость- геометрический аналог данной поверхности в 3D модели (на рис. 4 она выделена красными треугольниками). Далее на боковой поверхности А фланца определяют координаты 5 (можно больше, программа определит среднее значение) равномерно расположенных точек (выделены зеленым цветом), строится окружность – геометрический аналог данной поверхности. Возможный вариант – половины окружности при затруднении проникновения луча лазера через оборудование стенда. Затем программа проецирует окружность на ранее построенную плоскость и определяет координаты центра фланца ГД (желтая точка). Аналогично выполняют измерения, построения плоскостей и определения центра фланца редуктора – это поверхности Г и В.

На базе выполненных построений геометрических баз выполняется построение оси ГД (рис. 5), которая является базой расчета размеров ГД (плеч рычагов).



Рисунок 5 – Определение измерительной базы – оси ГД (расположен слева) связанного через валопровод со стендовым редуктором (расположен справа)

На следующем этапе определяют координаты центра передаточных устройств (рычагов). С этой целью устанавливают сферу в специально предусмотренные конструкцией калибровочные отверстия передаточных устройств - рычагов (рис. 6), сфера при этом самоцентрируется за счет фасок калибровочного отверстия. Далее определяют ее (сферы) координаты, которые и являются координатами центров передаточных устройств (рычагов) (см. рис. 3, рис. 5).

На заключительном этапе рассчитывают размеры между передаточными устройствами, т.е. длины плеч передаточных рычагов силоизмерительной системы гидравлического динамометра, расстояние между осью ГД (базой) и передаточными устройствами. Полученные размеры являются исходными данными для выполнения калибровки или аттестации ГД.



Рисунок 6 – Определение размера L – рычага ГД, передающего Мкр на силоизмерительную систему (см. рис. 3)

Выводы

Практика работы на предприятии показала, что при подготовке к испытанию газотурбинных агрегатов различного назначения, в частности при аттестации измерительного оборудования перед монтажом изделия, реализация метрологического требования о том, что все измерения в сфере государственного регулирования должны выполняться в соответствии с аттестованными методиками (методами) измерений, представляет определенную метрологическую и техническую задачу. С проблемами аттестации используемых СИ часто сталкиваются как отечественные, так и зарубежные производители достаточно совершенной и нужной в отечественном машиностроении цифровой измерительной техники. Использовать в РФ в серийном производстве продукции СИ, не внесенные в Госреестр, т. е. не имеющих соответствующих свидетельств об утверждении типа – запрещается, даже при наличии соответствующих зарубежных сертификатов качества, калибровки аттестованных за рубежом испытательных лабораторий. Тем не менее, данные проблемы могут быть успешно решены за счет разработки, аттестации и внедрения методик выполнения измерений.

Применительно к рассмотренному в настоящей публикации вопросу – необходимости аттестации системы измерения крутящего момента на испытательном стенде, основанной на гидравлическом динамометре – нагрузочном устройстве с рычажно - нагрузочной системой калибровки датчика силы, данная проблема была связана с отсутствием методики выполнения измерений и вычислений, т.е. получения и обработки основной информации исходных данных. На предприятии эта проблема была успешно решена: при использовании разработанной методики, основанной на измерениях размеров ГД с помощью лазерного трекера, установлено, что среднеквадратические отклонения погрешностей измерения рычагов "L" лазерным трекером составили не более 0,005... 0,02 мм, т.е. не более 0,008 % от измеряемых значений.

Разработанная и аттестованная в соответствии с ГОСТ Р 8.563-2009 методика позволяет не только выполнить необходимые измерения в процессе испытания изделия, но и аттестовать в уникальное оборудование испытательного стенда на соответствие ГОСТ Р 8.568-97.

Список литературы

1. Ерошков В.Ю. Опыт использования системы лазерной центровки валов при монтаже корабельных газотурбинных агрегатов на испытательном стенде // Газотурбинные технологии. – Рыбинск: ООО «ИД Газотурбинные технологии», 2017. – С. 22 – 26.
2. Развитие трекеров: оценка технологии лазерных трекеров. Решения компании HEXAGON. URL: <https://www.hexagonmi.com/ru-RU/solutions/technical-resources/technical-articles/tracking-progress-reevaluating-laser-tracker-technology> (дата обращения: 05.04.2019).
3. ГОСТ Р 8.563-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений
4. ГОСТ Р 8.568-97 Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения

USE OF A PORTABLE COORDINATE-MEASUREMENT MACHINE WITH A LASER TRACKER FOR CALIBRATION OF TEST BENCH MEASURING EQUIPMENT BEFORE TESTS

Eroshkov V.Yu.PhD (Engineering), e-mail: eroschkow@mail.ru

Public Joint-Stock Company UEC-Saturn, 152903, Lenin Avenue 163, Rybinsk, Yaroslavl Region,

Abstract

The process of using a portable coordinate-measurement complex with a laser tracker for qualification of measuring equipment at gas-turbine engine test bench and for control of overall dimensions of the tested product was studied. Using of qualified coordinate-measurement systems which remotely determine the spatial location ensures the accurate assessment of gas-turbine unit assembly and installation before tests and allows to confirm the reliability of measurement results of main operating parameters of a product by test bench equipment.

Keywords: tests, coordinate-measurement systems, laser tracker, gas-turbine unit, method, calibration, qualification.

УДК

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА В СОЕДИНЕНИИ ОСЬ – ШАЙБА ПРИ СБОРКЕ ЖЕРЕБЕЕК ПРЕССОВАНИЕМ

*КУДРЯВЦЕВА Юлия Станиславовна¹, канд. техн. наук, доцент,
e-mail: yu.semenova@corp.nstu.ru
ПУКЛАКОВ Дмитрий Анатольевич¹, магистрант,
e-mail: dap_1997ru@mail.ru*

Новосибирский государственный технический университет, 630087,
Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Аннотация

В работе приведены результаты расчетов необходимого натяга, обеспечивающего работоспособность сборочной единицы (жеребейки) при ее сборке прессованием, а также результаты моделирования процесса прессования для определения необходимого усилия для создания такого натяга при сборке одного типоразмера жеребеек. Предложен алгоритм расчета натяга, препятствующего проскальзыванию отверстия по валу при воздействии заданной нагрузки. Показано, что принятые при расчетах допущения позволяют определять с достаточной для инженерных расчетов точностью необходимые технологические параметры, обеспечивающие сборку работоспособной жеребейки. Описываемый подход применим для любого типоразмера и ограничен технологическими возможностями оборудования и способностью материала к деформированию.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, прессование, обеспечение натяга

Введение

Большинство инженерных задач направлены на обеспечение работоспособности элементов конструкции при заданных условиях эксплуатации. При этом задача конструктора – установить необходимые размеры элементов конструкции и назначить допуски, а задача технолога – обеспечить требования конструкции при изготовлении изделия. Зачастую решение этих двух задач должно согласовываться между технологами и конструкторами на этапе конструкторской и технологической подготовки производства. Данная работа направлена на решение одной из таких задач на примере расчета и обеспечения натяга при сборке жеребеек. Жеребейки – это опоры под консольные элементы и стержни, устанавливаемые в литейную форму и изготавливаемые из материала, близкого по свойствам к материалу отливки, что позволяет оставлять их в теле отливки без ущерба для работоспособности конструкции детали при ее дальнейшей эксплуатации (Рис. 1) [1].

Одним из основных критериев работоспособности жеребеек является их несущая способность. Для данной конструкции жеребеек это свойство будет определяться способностью сохранения взаимного расположения элементов жеребейки при заливке металла в литейную форму. Задача обеспечения этого свойства для конструктора после выбора материала и расчета размеров элементов конструкции сводится к выбору посадки с натягом в соединении шайб со стержнем. Задача технолога – определить способ обеспечения такой посадки и рас-

считать режимы технологической операции сборки шайб со стержнем. Ниже представлены способы решения этих задач.

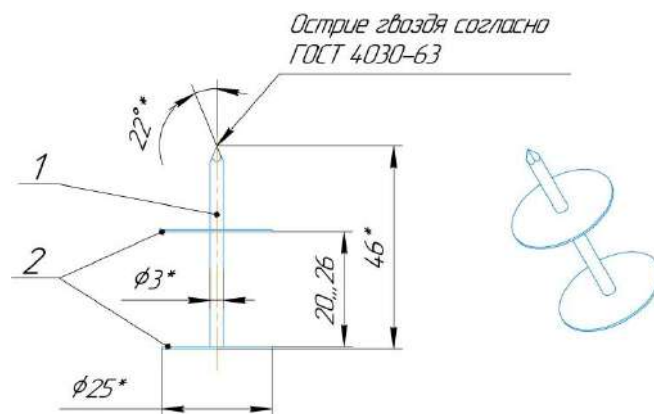


Рисунок 1 – Конструкция жеробейки

1 – ось, 2 – шайбы, * - размеры указаны для одного типоразмера жеробеек

Расчет необходимого натяга

При выборе величины максимальной нагрузки, которую должна выдержать посадка шайбы на стержень, было сделано допущение, что вся масса заливаемого металла наибольшей отливки, изготавливаемой на предприятии, будет давить на шайбу. Таким образом, сдвиговая нагрузка, которой должно противостоять соединение будет равно 200Н. Сопротивляться весу в 200 Н в соединении будет сила трения, которая зависит от размеров соединяемых деталей, натяга и шероховатости контактирующих поверхностей.

Расчетный натяг (N) можно определить по формуле [2]:

$$N = N_D + N_d = pd \left(\frac{C_D}{E_D} + \frac{C_d}{E_d} \right) \quad (1)$$

где N_D и N_d – величина деформации в отверстия шайбы и на поверхности оси, соответственно, p – давление на поверхности контакта оси и шайбы, возникающее при натяге, $d=D$ – номинальный диаметр сопрягаемых поверхностей, $E_D=E_d$ – модули упругости материалов оси и шайбы, C_D и C_d – коэффициенты, определяемые формулами:

$$C_D = \frac{1 + \left(\frac{d}{d_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{d}{d_2}\right)^2} + \mu_D \quad (2)$$

$$C_d = \frac{1 + \left(\frac{d_1}{d}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_1}{d}\right)^2} + \mu_d \quad (3)$$

где $d_1=0$ при использовании сплошного стержня для оси, d_2 – наружный диаметр шайбы (25 мм=0,025м), $\mu_d = \mu_D = 0,3$ – коэффициенты Пуассона для материалов оси и шайбы, соответственно.

Для обеспечения неподвижности соединения при нагружении осевой силой P необходимо, чтобы это усилие не превышало сил трения, возникающих на поверхности контакта оси и шайбы. Тогда давление p определяется условием:

$$p \geq \frac{P}{\pi \cdot d \cdot h \cdot f} \quad (4)$$

где $(\pi \cdot d \cdot h)$ – площадь поверхности контакта оси и шайбы, f – коэффициент трения скольжения между осью и шайбой (при сборке прессованием принимается $f=0,08$).

Таким образом, минимальный натяг в соединении оси с шайбой будет определяться выражением:

$$N_{min} = \frac{P \left(\frac{C_D}{E_D} + \frac{C_d}{E_d} \right)}{\pi \cdot d \cdot h \cdot f} \quad (5)$$

Однако, в формуле (5) не учитывается влияние шероховатости сопрягаемых поверхностей. При этом следует отметить, что микронеровности на поверхностях оси и отверстия шайбы уменьшают прочность соединения, т.к. натяг в пределах шероховатости ослаблен тем, что контакт происходит не со сплошным металлом (Рис. 2). Согласно опыту предыдущих работ [2], при прессовании деталей в холодном состоянии вершины неровностей сминаются примерно на 0,6 своей величины с каждой стороны. Тогда следует увеличить минимальный натяг на величину Δ_{Rz} :

$$\Delta_{Rz} = 2(0,6R_{Zd} + 0,6R_{ZD}) = 1,2(R_{Zd} + R_{ZD}) \quad (6)$$

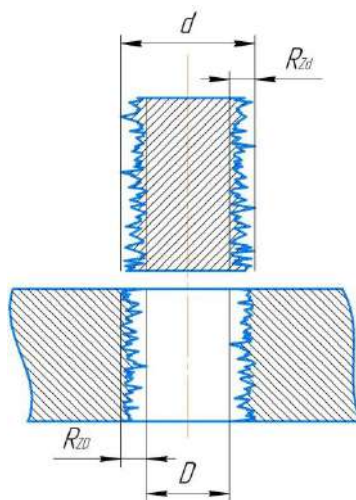


Рисунок 2 – Сопряжение шероховатых поверхностей

Также важно учесть, что соединение работает при высоких температурах, соответственно натяг может измениться за счет температурного расширения материалов шайбы и оси:

$$\Delta_T = d(\Delta_{T2}\alpha_2 - \Delta_{T1}\alpha_1) \quad (7)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты линейного расширения, Δ_{T1} и Δ_{T2} – перепад температур для оси и шайбы, соответственно. Если допустить, что в процессе заливки металла в форму ось и шайбы нагреваются с одной скоростью, то их размеры будут изменяться одинаково, значит, натяг не изменится ($\Delta_T = 0$).

В результате, минимально допустимый расчетный натяг соединения оси и шайбы с учетом шероховатости их поверхностей в зоне контакта составит:

$$N_{min} = \frac{P \left(\frac{C_D}{E_D} + \frac{C_d}{E_d} \right)}{\pi \cdot d \cdot h \cdot f} + 1,2(R_{Zd} + R_{ZD}) = 14,08 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Величину действительного натяга следует задавать таким образом, чтобы гарантировать работоспособность соединения при любом сочетании размеров оси и шайбы с некоторым запасом. Соответственно, усилие прессования выбирается с учетом коэффициента:

$K=1,5$, т.е. действительный натяг, который необходимо обеспечить в соединении должен составлять не менее 21 мкм на диаметр.

Определение необходимого усилия прессования

Для определения величины усилия, необходимого для создания натяга в соединении оси и шайбы использовалась модель, созданная в среде ANSYS Static Structural.

В качестве исходных данных были заданы следующие параметры:

– исходная посадка шайбы на ось выбрана из условия минимального гарантированного зазора: $\text{Ø}3\text{H}7/\text{h}7$ (ввиду необходимости сборки 100% комбинаций осей и шайб на предыдущем этапе производства жеребеек);

– материал оси и шайб – конструкционная низкоуглеродистая сталь;

– место приложения усилия прессования – плоский торец оси, жесткая заделка по торцу с остроконечной формой

– при расчетах сделано два допущения: 1) в задаче не учитывается возможная потеря устойчивости стержня. Это обосновано тем, что шайбы и опора одного из торцов частично компенсируют возможный изгиб стержня при приложении сжимающей нагрузки; 2) наличие шероховатости на сопрягаемых поверхностях не учитывается в модели и компенсируется коэффициентом запаса для натяга.

При построении твердотельной модели использовалось четыре различных варианта:

- диаметр оси и диаметр отверстия шайбы равны номинальному размеру посадки (минимальный зазор)
- диаметр оси минимальный, диаметр шайбы – максимальный (максимальный зазор)
- диаметр оси – максимальный, диаметр отверстия максимальный (средняя величина зазора при максимальных размерах оси и шайбы)
- диаметр оси – минимальный, диаметр отверстия минимальный (средняя величина зазора при минимальных размерах оси и шайбы).

Это позволяет проанализировать влияние исходной геометрии на формирование натяга в пределах возможных вариантов сочетаний оси и шайб для выбранной посадки. В ходе моделирования был определен диапазон значений усилия прессования – от 10000Н до 30000Н для обеспечения требуемого натяга. Дальнейшее увеличение усилия может привести к разрушению материала, а меньшие усилия не позволяли достичь существенной деформации материала оси. Для анализа характера изменения напряженно-деформированного состояния расчеты проводились для 5 значений усилия с шагом 5000Н.

Для каждой модели была задана сетка с переменным значением размеров конечных элементов: они были уменьшены в исследуемой области (зоне контакта) по отношению ко всему объему деформируемого изделия с целью повышения точности расчетов (Рис.3).

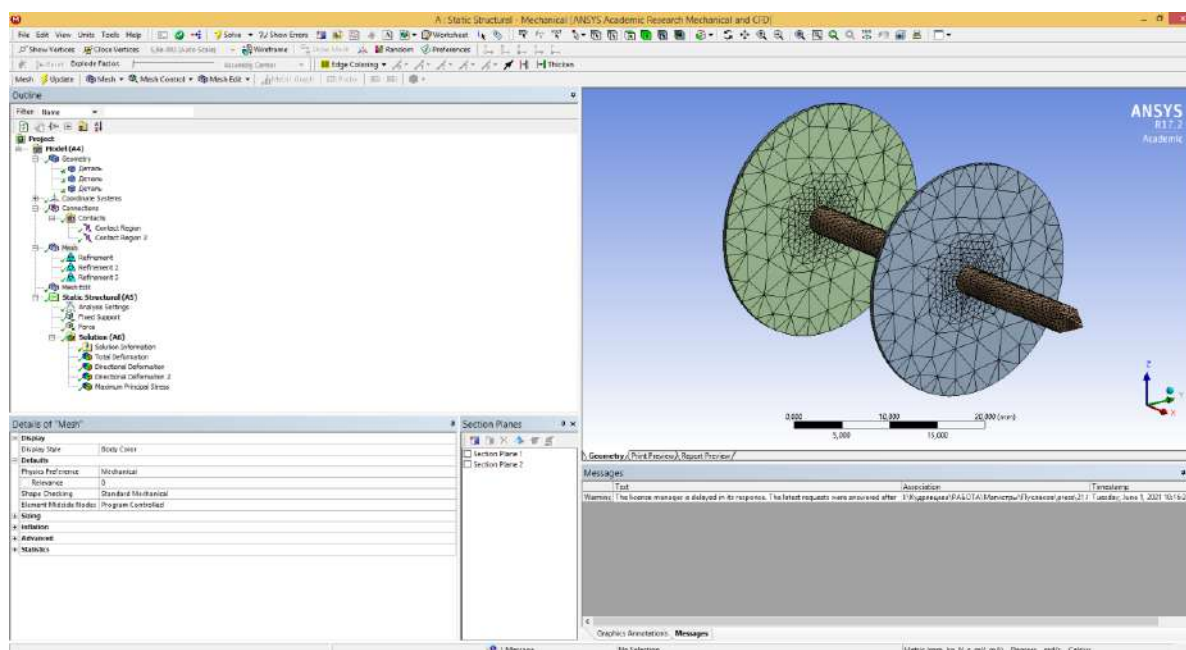


Рисунок 3 – Построение сетки конечно-элементного моделирования

Результаты и обсуждение

В качестве иллюстрации результатов моделирования представлен рис. 4. Из рисунка видно, что нагрузка от прессования стержня приводит к возникновению напряжений вблизи поверхности контакта. Незначительная неравномерность распределения напряжений по кольцевым зонам вокруг центра сопряжения объясняется достаточно крупным размером конечных элементов. Однако для данных расчётов такой точности вполне достаточно, а дальнейшее измельчение сетки приведет к значительному увеличению времени расчетов, что нецелесообразно.

Для каждого характерного варианта сопряжений рассчитывались деформации в направлениях по двум осям (Y и Z), перпендикулярным к оси жеребейки, после чего значения усреднялись. Также определялось изменение длины стержня в зависимости от прилагаемой нагрузки. Оказалось, что при нагружении стержня до 30000 Н изменение его длины не превысило 1 мм. Следует отметить, что несмотря на то, что изменение длины не влияет на эксплуатационные свойства изделия, нужно учесть это изменение при отрезке стержня, оставив запас на прессование.

Обобщенные результаты моделирования процесса формирования натяга в соединении ось – шайба для характерных рассматриваемых вариантов сопряжений в пределах посадки $3H7/h7$ представлены в таблице. Поскольку для обеспечения натяга необходимо, чтобы произошла пластическая деформация, нужно, чтобы напряжения в зоне контакта превысили предел текучести материала $\sigma_T = 225...255$ МПа [3] но при этом материал не разрушился, т.е. напряжения не должны превысить предел прочности на растяжение $\sigma_B = 370...480$ МПа (в области растяжения) и предел прочности на сжатие – 1370 МПа (в области сжатия). Из таблицы видно, что требуемое условие выполняется для всех случаев сопряжений при нагрузке от 25000 Н. При меньших нагрузках возможен вариант, когда усилие прессования приведет к возникновению упругих деформаций, которые восстановятся после снятия нагрузки, не обеспечив требуемого натяга. При этом максимальные напряжения не превышают предела

прочности, что позволяет сделать вывод о том, что элементы жеребейки не разрушатся в процессе прессования во всем исследуемом диапазоне.

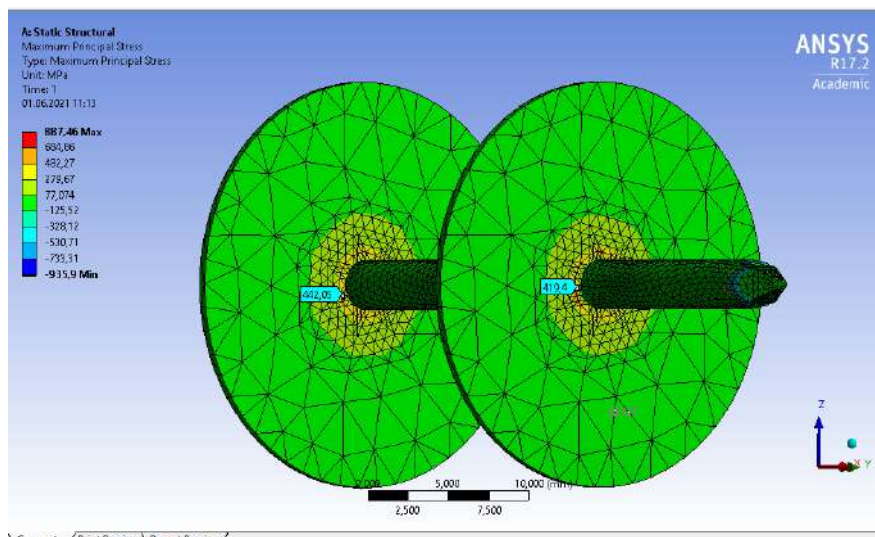


Рисунок 4 – Распределение напряжений в области деформирования после прессования оси жеребейки

Таблица

Результаты моделирования

Диаметр кольца, мм (min)/ (max)	Диаметр оси, мм (min)/ (max)	Усилие прессования, Н	Напряжения на кольце, МПа	Напряжения на оси, МПа	Расчетная величина натяга, мкм	Изменение длины оси, мм
(min) 3	(min) 2,99	10000	133	92	9	0,31
		15000	195	132	15	0,52
		20000	225	177	20	0,75
		25000	257	236	26	0,94
		30000	337	277	30	1
(min) 3	(max) 3	10000	137	81	10	0,30
		15000	210	114	16	0,46
		20000	256	143	22	0,61
		25000	296	162	27	0,76
		30000	442	222	33	0,92
(max) 3,01	(min) 2,99	10000	128	83	10	0,33
		15000	192	112	15	0,49
		20000	234	132	21	0,65
		25000	288	173	25	0,81
		30000	412	262	31	0,97
(max) 3,01	(max) 3	10000	129	86	10	0,32
		15000	189	116	15	0,48
		20000	215	187	20	0,65
		25000	262	226	24	0,81
		30000	368	274	31	0,97

Выводы

Произведенные в ходе работы расчеты показали, что необходимый натяг ($\min 21\text{мкм}$) при сборке жеребеек прессованием стержня должен создаваться усилием 25000Н. При таком усилии в материале шайбы и оси в зоне контакта возникают необходимые и достаточные значения деформаций для обеспечения работоспособности конструкции жеребейки в процессе заливки металла в форму. Расчет напряжений в зоне контакта позволяет утверждать, что при таком усилии происходит пластическая деформация, т.к. превышен предел текучести, натяг в $\min 21\text{ мкм}$ обеспечивается для любой комбинации размеров оси и шайбы, и при этом материал не испытывает напряжений, превышающих предел прочности.

Список литературы

1. ГОСТ 9062-89 Жеребейки для чугуновых и стальных отливок. Общие технические условия.
2. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для бакалавров / Я. М. Радкевич, А.Г. Схиртладзе. – 5-е изд., перераб и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2012. – 813 с.
3. ГОСТ 16523-97 Прокат тонколистовой из углеродистой стали качественной и обыкновенного качества общего назначения. Технические условия.

STRESS-STRAIN ANALYSIS OF THE CYLINDER–WASHER JOINT USED IN THE PRODUCTION OF CHAPLETS

Kudryavtseva Y.S., Cand. tech. Sciences, Associate Professor,

e – mail: yu.semenova@corp.nstu.ru

Puklakov D.A., Master's student e – mail: dap_1997ru@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 630087, K. Marks prospect, 20, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

The paper presents the results of the analysis of the tightness required to ensure the operability of the cylinder – washer joint when assembling chaplets by pressing. The results of modeling the pressing process to determine the required force to create the calculated value of tightness when assembling one standard size of chaplets are also presented. An algorithm is shown for calculating the tightness that prevents the washer hole from slipping along the shaft when a working load is applied. It is shown that the assumptions made while modeling make it possible to determine, with appropriate accuracy for engineering calculations, the required technological parameters that ensure the workability of the chaplet joint. The approach described is applicable for any standard size and is limited by the technological capabilities of equipment and the deformability of a material.

Keywords: stress-strain state, pressing, tightness.

УДК

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВИБРАЦИОННОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

*ТАМАРКИН Михаил Аркадьевич¹, доктор техн. наук, профессор,
e-mail: tehn_rostov@mail.ru*

*ТИЩЕНКО Элина Эдуардовна¹, кандидат технических наук, доцент,
e-mail: lina_tishenko@mail.ru*

*ТИЩЕНКО Роман Геннадьевич¹, студент,
e-mail: tishenkoroma@icloud.com*

¹ФБГОУ ВО Донской государственный технический университет (ДГТУ), 344000,
г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Аннотация

Статья посвящена разработке методики оптимизации технологических процессов вибрационной обработки в среде абразива. Выполнены теоретические исследования процесса. Определены параметры единичного следа, который оставляет частица среды при ударе о поверхность детали. Представлена зависимость для определения среднего арифметического отклонения профиля шероховатости обработанной поверхности. Установлена зависимость для расчета времени обработки. Приведена методика оптимизации технологических процессов вибрационной абразивной обработки. Разработан программный продукт с использованием среды разработки программного обеспечения Microsoft Visual Studio на языке программирования C#, позволяющий автоматизировать процесс проектирования технологического процесса и выполнить его оптимизацию по производительности.

Ключевые слова: вибрационная абразивная обработка, шероховатость поверхности, время обработки, разработка программного продукта

Введение

Вибрационная обработка в абразивной среде, находящейся в свободном состоянии, как правило, является заключительной операцией в технологии изготовления детали. Метод позволяет при сравнительно простых кинематических схемах оборудования, осуществлять обработку деталей сложной конфигурации из различных материалов. Особенностью рассматриваемого процесса является одновременная обработка большого количества деталей без закрепления, возможность обработки деталей различных размеров (от нескольких миллиметров до нескольких метров), а также деталей малой жесткости. Температурный режим процесса низкий, что позволяет получать высокое качество обработанной поверхности без прижогов, микротрещин и нежелательных структурных изменений. [1,2].

Широкие технологические возможности методов обработки в гранулированных абразивных средах, к которым относится рассматриваемый процесс, позволяют осуществлять операции шлифования, полирования, удаления заусенцев и облоя, скругления острых кромок и подготовить деталь к нанесению качественного покрытия. При этом обработка при использовании абразивной среды производится в основном в пределах профиля исходной шероховатости, т.е. является "безразмерной", однако при необходимости удаления дефектного слоя

(после литья, штамповки и т.п.) можно снимать припуск за счет увеличения времени обработки.

Описание теоретических и экспериментальных исследований

При исследовании основных технологических параметров метода вибрационной абразивной обработки одним из важнейших является вопрос теоретического моделирования процесса единичного взаимодействия абразивных частиц с поверхностью обрабатываемой детали. Исследователями в данной области установлено, что режущий инструмент формируется непосредственно в процессе обработки как среда с особыми свойствами и определенными внутренними связями [1-7]. При многократном взаимодействии частиц среды с поверхностью детали часть соударений приводит к микрорезанию. В результате воздействия гранул образуются абразивные царапины с поперечной шероховатостью, копирующей эффективный режущий профиль. Образование микрорельефа поверхности в процессе обработки происходит путем многократного наложения и пересечения абразивных царапин, оставляемых абразивными телами. Очевидно, что в первую очередь абразивный инструмент будет контактировать с выступами исходной шероховатости, при этом будет происходить постепенное скругление выступов. В процессе обработки высотные параметры профиля исходной шероховатости будут уменьшаться, а шаговые параметры будут изменяться незначительно до достижения шероховатости, параметры которой не изменяются, а воспроизводятся с течением времени. Такая шероховатость получила название установившейся.

Для описания механизма формирования свойств поверхностного слоя при вибрационной абразивной обработке можно применить общий подход, заключающийся в определении количественных параметров единичного взаимодействия абразивных гранул с поверхностью детали и их оценке с использованием вероятностных методов, позволяющих рассчитать количество взаимодействий в единицу времени на единице площади детали. В соответствии с этим определена максимальная глубина внедрения частицы среды в поверхность обрабатываемой детали [1-7]:

$$h_{\max} = 2 \cdot V_{\text{эф}} \cdot R \cdot \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_q}{3 \cdot K_R \cdot c \sigma_s}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{эф}}$ - эффективная скорость движения частицы; R - радиус частицы; ρ_q - плотность материала частицы; β - угол удара частицы о поверхность обрабатываемой детали; σ_s - предел текучести материала детали, c - коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности; K_R - коэффициент, учитывающий влияние зернистости абразивной частицы на фактическую площадь контакта, который определяется по зависимости:

$$k_R = \sqrt[3]{\frac{48 \cdot \rho_q}{c \cdot \sigma_s} \cdot \left(\frac{k_p \cdot V_{\text{эф}} \cdot \sin \beta \cdot \chi \cdot Y(\alpha) \cdot (1 - \varepsilon_3) \cdot \bar{x}}{\alpha^2 \cdot (\bar{x}^2 + 3 \cdot \sigma^2)} \right)^2} \quad (2)$$

где χ - доля, занимаемая абразивными частицами в единице объема частицы; k_p - коэффициент, определяющий число абразивных зерен, вступивших в контакт с поверхностью детали при внедрении частицы, α - коэффициент формы зерна; $Y(\alpha)$ - функция, зависящая от α ; ε_3 - коэффициент, учитывающий заделку зерен в связке; \bar{x} - средний размер абразивных зерен; σ - среднее квадратичное отклонение размера зерен.

След единичного взаимодействия представляет собой эллипсоид с полуосями:

$$b = \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2},$$

$$a = \frac{\pi}{2}(\operatorname{ctg}\beta - f) \cdot h_{\max} + b, \quad (3)$$

где f - коэффициент пропорциональности.

Образование микрорельефа в процессе обработки происходит путем многократного наложения и пересечения единичных следов. В результате на поверхности детали образуется новый специфический микрорельеф, который характеризуется однородностью свойств по всем направлениям. Для расчета параметров профиля шероховатости обработанной поверхности использована методика, предложенная профессором А.В. Королевым [8], разработанная им для описания теоретико-вероятностного процесса формирования профиля шероховатости поверхности детали при абразивной обработке. Среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости обработанной поверхности при вибрационной обработке в абразивных средах можно определить по формуле:

$$Ra_{ycm} = 0,09 \sqrt{\frac{h_{\max} \cdot l_{e0}}{z_0}}, \quad (4)$$

где l_{e0} - единичная длина; z_0 - номинальное число вершин зерен над единицей поверхности связки.

Снижение высотных параметров исходной шероховатости имеет сложный характер. Как отмечают многие исследователи [1-4], изменение шероховатости поверхности носит экспоненциальный характер. Скорость образования нового рельефа снижается от максимального значения в начальный период, до значений, мало отличающихся от нуля к моменту образования установившейся шероховатости, что свидетельствует о формировании непрерывно воспроизводимого рельефа поверхности. Каждой комбинации технологических параметров соответствует такая удельная плотность взаимодействий и такой уровень энергии частиц среды, которые однозначно определяют как продолжительность периода достижения установившейся шероховатости, так и высотные параметры установившегося микрорельефа, причем последние зависят от исходной шероховатости. Это обстоятельство важно для правильной аппроксимации зависимости $Ra(t)$. Вышеуказанным условиям удовлетворяет выражение:

$$Ra(t) = (Ra_{ucx} - Ra_{ycm}) e^{-k_u t} + Ra_{ycm} \quad (5)$$

где Ra_{ucx} - среднее арифметическое отклонение профиля исходной шероховатости, k_u - коэффициент интенсивности уменьшения шероховатости, t - время обработки.

Если определить значение k_u и Ra_{ycm} для конкретных условий обработки, то подставляя в (5) вместо Ra заданное значение этого параметра $Ra_{зад}$ при условии $Ra_{зад} > Ra_{ycm}$ получим требуемую продолжительность обработки для изменения шероховатости от Ra_{ucx} до $Ra_{зад}$.

Время достижения заданного значения среднего арифметического отклонения профиля шероховатости обрабатываемой поверхности можно определить следующим образом:

$$t = -\frac{1}{k_u} \cdot \ln \frac{Ra_{зад} - Ra_{ycm}}{Ra_{ucx} - Ra_{ycm}}. \quad (6)$$

Коэффициент k_u , входящий в зависимости (5) и (6), не представляется возможным

получить теоретически, однако есть возможность его экспериментального определения. На основании многочисленных экспериментальных исследований для вибрационной абразивной обработки получен банк данных таких коэффициентов, что позволяет сравнивать различные варианты сочетаний технологических параметров и режимов для достижения соответствующих значений k_n при обработке деталей из различных материалов, снижать время обработки и оптимизировать технологический процесс.

Представленные теоретические зависимости прошли комплексную экспериментальную проверку при обработке в вибрационных установках деталей из различных материалов с использованием абразивной среды.

При изготовлении образцов использовались материалы, применяемые в различных отраслях машиностроения: стали, алюминиевые сплавы, цветные металлы. Установлено формирование улучшенных параметров поверхностного слоя и повышение эксплуатационных свойств деталей при обработке. Экспериментально определены значения установившейся шероховатости для различных материалов и режимов обработки. Выполнено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. На рис. 1-3 теоретические зависимости установившейся шероховатости поверхности от параметров обработки построены с помощью программы MATH CAD и выполнены сплошной линией. Использовались банки данных коэффициентов, полученные исследователями рассматриваемого процесса. Точками обозначены экспериментальные значения. Доверительные интервалы построены с доверительной вероятностью 95%.

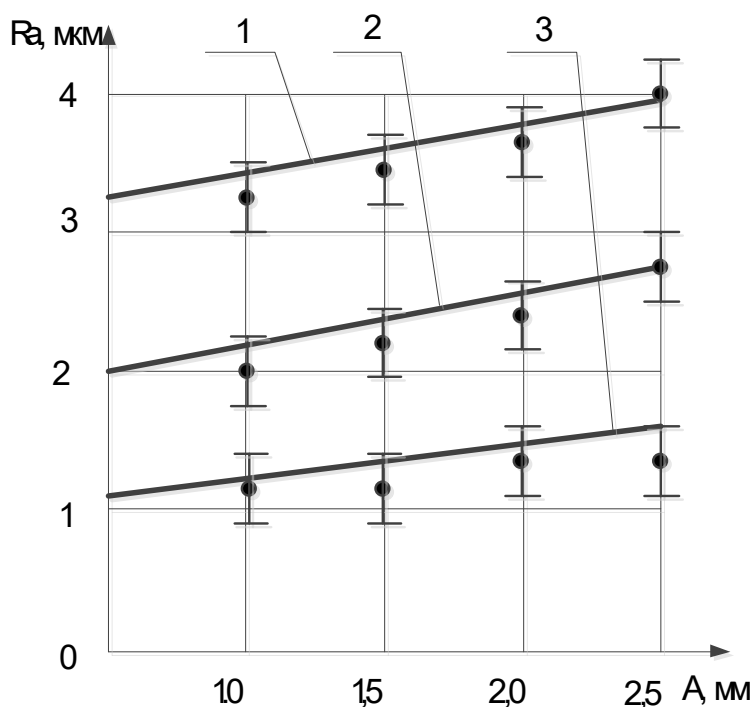


Рисунок 1 – Зависимость шероховатости от амплитуды колебаний рабочей камеры при вибрационной обработке в среде абразива. Материал детали – сталь 45, частота колебаний камеры - 26 Гц. Рабочие среды: 1 –призмы ПТ 25x25 (зернистость 25), 2 - конуса (зернистость 16), 3 – призмы ПТ 15x15 (зернистость 12)

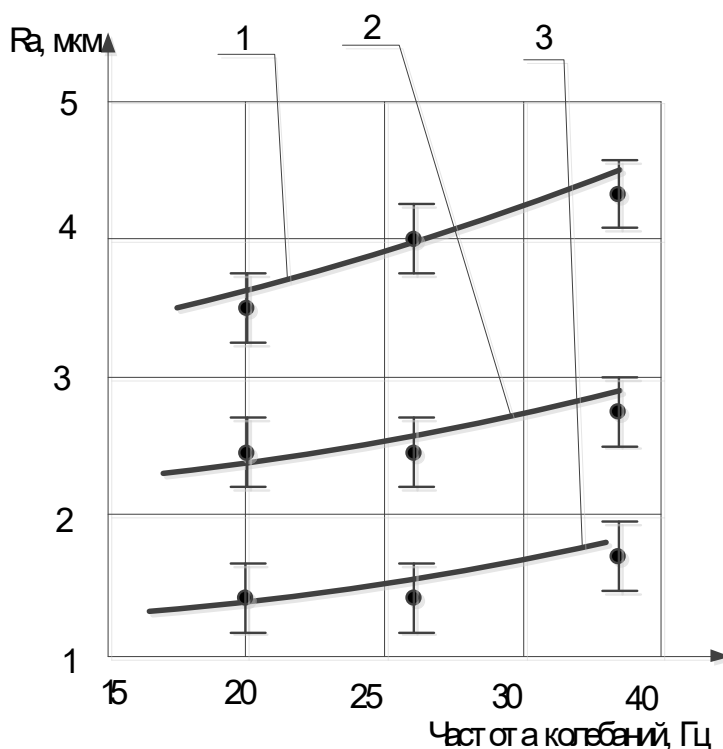


Рисунок 2 – Зависимость шероховатости от частоты колебаний рабочей камеры при вибрационной обработке в среде абразива. Материал детали – сплав АВТ. Амплитуда колебаний камеры – 2.5 мм. Рабочие среды: 1 –призмы ПТ 25х25 (зернистость 25), 2 - конуса (зернистость 16), 3 – призмы ПТ 15х15 (зернистость 12)

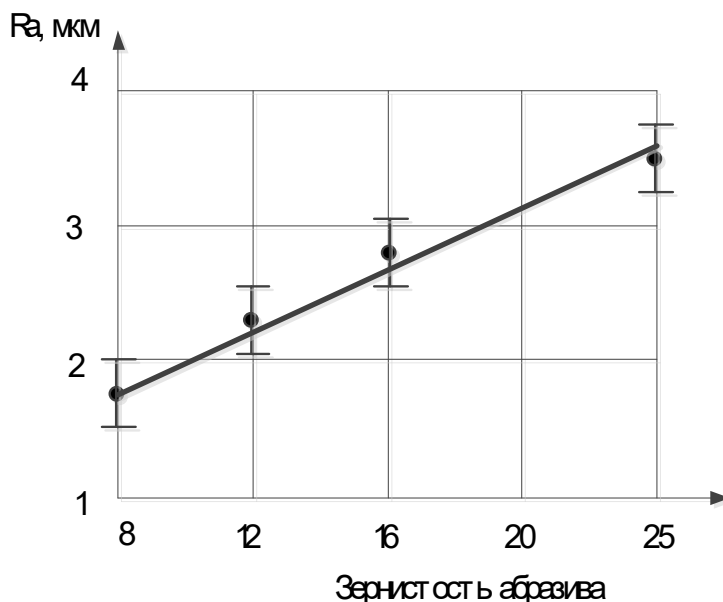


Рисунок 3 – Зависимость шероховатости поверхности от зернистости при вибрационной обработке в среде абразива. Материал детали – ХВГ. Частота колебаний камеры – 33Гц, амплитуда – 1,5 мм.

Результаты и обсуждение

Установлена высокая сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований. Расхождение не превышает 20%, что свидетельствует об адекватности полученных зависимостей и возможности осуществления правильных расчетов по ним. Произведена проверка адекватности по критерию Фишера.

Полученная система моделей может быть использована для проектирования технологических процессов.

При моделировании процессов вибрационной обработки в среде абразива рассмотрено влияние исходных факторов на основные показатели обработки (технологические режимы, исходную шероховатость поверхности обрабатываемой детали, размеры частиц среды). Это позволило произвести ранжирование технологических факторов, выбрать основные, которые оказывают существенное влияние, определить какие из них для формирования множества проектных решений следует задавать одним значением, а какие массивом чисел [1,2].

Разработана методика оптимизации технологических процессов обработки деталей в гранулированных абразивных средах и САПР ТП в виде САМ модуля, который позволяет по характеристике детали выбрать возможные методы обработки в гранулированных абразивных средах (в порядке предпочтительности), для каждого из них определить технологические режимы и характеристики рабочих сред, обеспечивающие минимальное время обработки, необходимое для получения заданной шероховатости, рассчитать потребное количество станков и рабочих сред для выполнения годовой программы и путем экономического сравнения выбрать оптимальный вариант технологического процесса.

Разработан программный продукт с использованием среды разработки программного обеспечения Microsoft Visual Studio на языке программирования С#.

Программа имеет удобный интерфейс (рис. 4) и позволяет в диалоговом режиме задавая материал и конструктивные особенности обрабатываемой детали, необходимые параметры качества поверхности в автоматическом режиме проектировать технологический процесс, выполняя оптимизацию по производительности (времени) обработки (рис.5).

Проектирование технологического процесса обработки в абразивных гранулированных средах

Введите исходные данные для проектирования:

Выберите тип детали по классификации
штулка

Выберите из перечня конструктивные особенности детали, которые необходимо учитывать при проектировании технологического процесса
у детали имеются отверстия диаметром более 20 мм

Выберите материал детали
сталь ХВГ

Введите массу детали
0,29 кг

Введите количество деталей, которые необходимо обработать
25 шт

Введите исходную шероховатость поверхности (Ra)
6,3 мкм

Введите параметр шероховатости поверхности, который необходимо получить (Ra)
2,5 мкм

Сбросить Обработать

Рисунок 4 – Панель ввода исходных данных для проектирования технологического процесса

Проектирование технологического процесса обработки в абразивных гранулированных средах

Предлагаемое количество вариантов технологических процессов 3

Минимальное время обработки обеспечивает вариант технологии 1

Для получения заданных параметров обработки детали предлагается

Вариант 1

Использовать в качестве оборудования
станок для вибрационной обработки УВГ 4x10

Одновременно можно обработать 25 деталей

Необходимое количество станков 1

Установить следующие режимы обработки:

Частота колебаний 26 Гц

Амплитуда колебаний 2 мм

Использовать в качестве рабочей среды
призмы трехгранные ПТ6х6

Связка абразивной среды керамическая Зернистость абразивной среды №12

Осуществлять промывку
0.2% раствор кальцинированной соды

Время обработки составит 41 мин

Сохранить Показать следующий вариант Закрыть

Рисунок 5 – Предлагаемый вариант технологии обработки детали

Аналогичным образом программа описывает другие возможные варианты реализации технологического процесса. Разработка нескольких вариантов позволяет применять в условиях конкретного предприятия уже имеющееся оборудование и рабочие среды без дополнительных затрат на их приобретение.

Приведенные результаты исследований прошли промышленную апробацию и успешно используются на машиностроительных предприятиях региона.

Список литературы

1. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э. Основы оптимизации процессов обработки деталей свободным абразивом/ Saarboniken/Jermany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015
2. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э. Современное состояние и перспективы развития методов обработки в гранулированных рабочих средах. Научное издание «Технологии в машиностроении» №9 (111), 2020 С. 12-20
3. Тамаркин М. А., Тищенко Э. Э., Троицкий В. М., Мордовцев А. А. Подготовка деталей под покрытие обработкой в гранулированных абразивных средах/ Упрочняющие технологии и покрытия. - 2020. - Т. 16, № 9 (189). - С. 416-419
4. Tamarkin, M, Tishchenko, E, Chukarina, I., Sosnitskay, T: Part Processing Technology in Transport Engineering/Proceedings of the VIII International Scientific Siberian Transport Forum - TransSiberia 2019, Volume 1 (2019)
5. Tamarkin M., Tishchenko E., Azarova A., Butenko V. Surface quality formation at polymer composite details' abrasive processing/IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2020. - Vol. 918. - 9 p. - Article Number 012114. - (VIII International Scientific Conference Transport of Siberia - 2020 22-27 May 2020, Novosibirsk, Russia)
6. Tamarkin, M.A., Tishchenko, E.E., Murugova, E.V., Kozulko, N.V. Design technique of highly efficient technological processes for preparation of polymeric composite parts for adhesive bonding/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1029(1), 012003

7. Тамаркин М.А, Тищенко Э.Э., Верченко А.В., Троицкий В.М. Формирование качества поверхностного слоя при абразивной обработке полимеркомпозитных материалов/ Advanced Engineering Research, №3,2020.

8. Королёв А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: Из-во Саратов. ун-та, 1975 – 191 с.

УДК 621.9

РАЗРАБОТКА МАЛОГО РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА ОГРАНИЧЕННОЙ РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ

*ЧЕРДАНЦЕВ Павел Олегович, кандидат техн. наук,
e-mail: p004092@mail.ru*

*ЧЕРДАНЦЕВ Алексей Олегович, инженер,
e-mail: hypertigr@mail.ru*

*ЖИВОТИКОВА Оксана Евгеньевна, магистрант,
e-mail: zhivotikova@outlook.com*

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 656038,
Российская Федерация, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46

Аннотация

Приведены результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию прототипа робота-манипулятора ограниченной рабочей области. Для описания положений звеньев устройства решена обратная задача кинематики. В качестве двигателей использованы сервоприводы. В качестве исполнительного органа выбран электромагнит. Описана конструкция устройства, изложены общие принципы его программирования. Программирование осуществляется по принципу ключевых кадров, в которых задаются некоторые ключевые положения звеньев манипулятора. На промежуточных интервалах значения координат вычисляются при помощи интерполяции.

Ключевые слова: робот-манипулятор, позиционирование, система управления робота, обратная задача кинематики манипулятора.

Введение

В настоящее время, применение промышленных роботов, ранее характерное для ведущих производственных комплексов, распространилось на малые предприятия. Современные разработки позволяют увеличить эффективность производства, его окупаемость, при этом, повышается безопасность производства, сокращается процент брака. Однако на рынке предлагаются, в основном, крупные и средние промышленные роботы. При этом цели значительной части малых предприятий могут быть реализованы роботами-манипуляторами ограниченной рабочей области. Малые роботы-манипуляторы способны решать задачи подобного рода на производстве. С уменьшением габаритов уменьшается материалоемкость, стоимость изделия.

Робот манипулятор в общей форме представляется как модель черного ящика (рисунок 1).

С целью разработки улучшенного робота-манипулятора ограниченной рабочей области на кафедре Технология машиностроения АлтГТУ им. И.И. Ползунова был разработан прототип малого робота-манипулятора (рисунок 2).

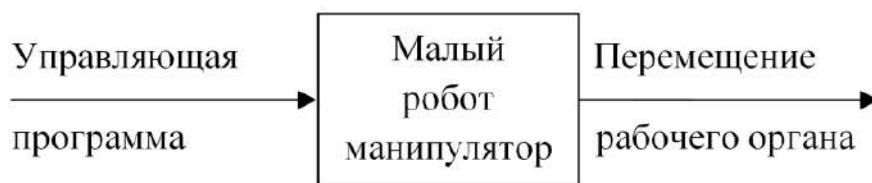


Рисунок 1 – Модель чёрного ящика

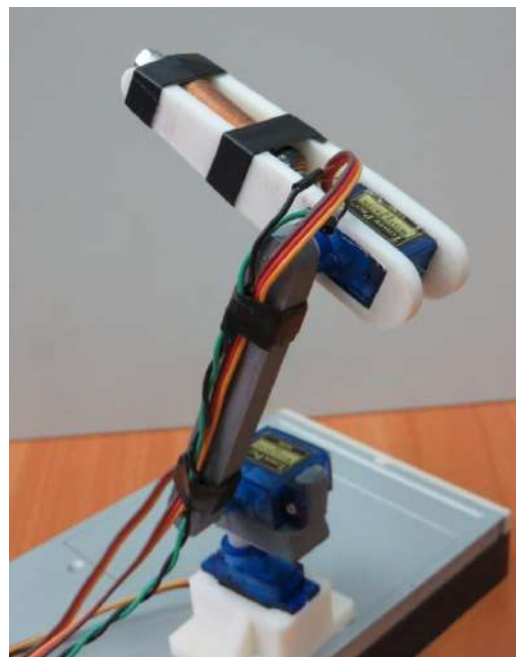
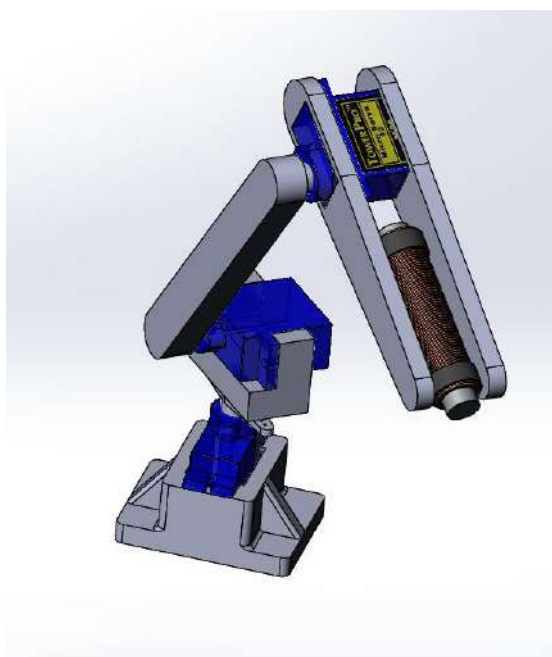


Рисунок 2 – 3D-модель робота-манипулятора и его реализация

Прототип включает в себя основание, подвижные звенья, сервоприводы, кабели, элементы крепления.

Преимуществами сервоприводов являются высокая скорость вращения, большие значения крутящих моментов, меньшие габариты. Их использование предполагает достаточную точность, за счет обратной связи по положению. Детали прототипа изготовлены из ABS пластика путем 3D-печати.

В качестве исполнительного органа могут использоваться различные схваты. Однако при разработке прототипа как исполнительный орган был выбран электромагнит. Его преимущество заключается в возможности захватывать объекты, не смотря на их форму и погрешность изначального положения.

Управляющая электроника воспроизведена на базе микроконтроллера ATmega328P. Им создаются управляющие сигналы для сервоприводов и устройства схвата. Основная программа выполняется на компьютере, от которого микроконтроллер воспринимает управляющие команды. Обмен данных компьютера и микроконтроллера выполняется через последовательный интерфейс UART.

Управляющая система осуществляет перемещение рабочих органов в пространстве за счет относительных угловых поворотов звеньев робота. Для формулирования зависимости углов от координат решается обратная задача кинематики [1]. На выходе имеем систему зависимости координаты схвата от углов.

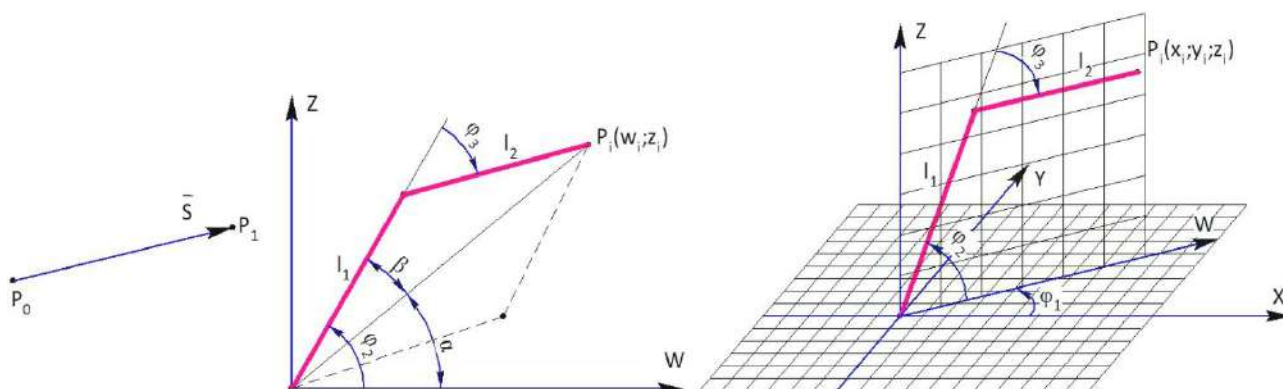


Рисунок 3 – Графическое решение

Вектор перемещения в кадре:

$$\vec{S} = \{x_1 - x_2; y_1 - y_2; z_1 - z_2\}$$

Перемещения в кадре

$$|S| = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$

Время выполнения кадра

$$t = S/F$$

где n – количество промежутков, i – номер рассчитываемой точки.

Координаты промежуточных точек

$$x_i = x_0 + x_s * t_i / n$$

$$y_i = y_0 + y_s * t_i / n$$

$$z_i = z_0 + z_s * t_i / n$$

Переход от вида $P_i(x_i; y_i; z_i)$ к виду $P_i(\varphi_{1i}; \varphi_{2i}; \varphi_{3i})$

$$\sin(\varphi_{1i}) = y_i / \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$

$$\cos(\varphi_{1i}) = x_i / \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$

Переход к расчетам в плоскостях WZ

$$W_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$

$$\sin(\alpha) = w_i / \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$

$$\cos(\alpha) = z_i / \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$

$$\cos(\beta) = \frac{l_1^2 + w_i^2 + z_i^2 + l_2^2}{2l_1 \sqrt{w_i^2 + z_i^2}}$$

Имеем два возможных решения:

$$1) \varphi_{2i} = \alpha + \beta$$

$$\varphi_{3i} = \arccos\left(\frac{w_i^2 + z_i^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2}\right)$$

$$2) \varphi_{2i} = \alpha - \beta$$

$$\varphi_{3i} = -\arccos\left(\frac{w_i^2 + z_i^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right)$$

Считаем предпочтительным вариант решения 1.

Оператор взаимодействует с роботом непосредственно через главную программу управления. Существует возможность управления при помощи пульта, а так же по созданной программе на языке G-code. Создать управляющую программу можно при помощи различных САМ-систем. Ручное управление дает возможность создания программ, точность позиционирования которых в общем случае несколько ниже. Однако временные затраты значительно сокращаются.

Программирование в таком случае происходит по принципу ключевых кадров. Оператор заносит ключевые кадры в программу, поочерёдно перемещая звенья робота в нужные состояния. После чего, при помощи интерполяции вычисляются значения промежуточных точек на интервалах. Итог представляется в виде временных диаграмм (рисунок 4), которые отражают состояние исполняющего устройства в каждый момент времени.

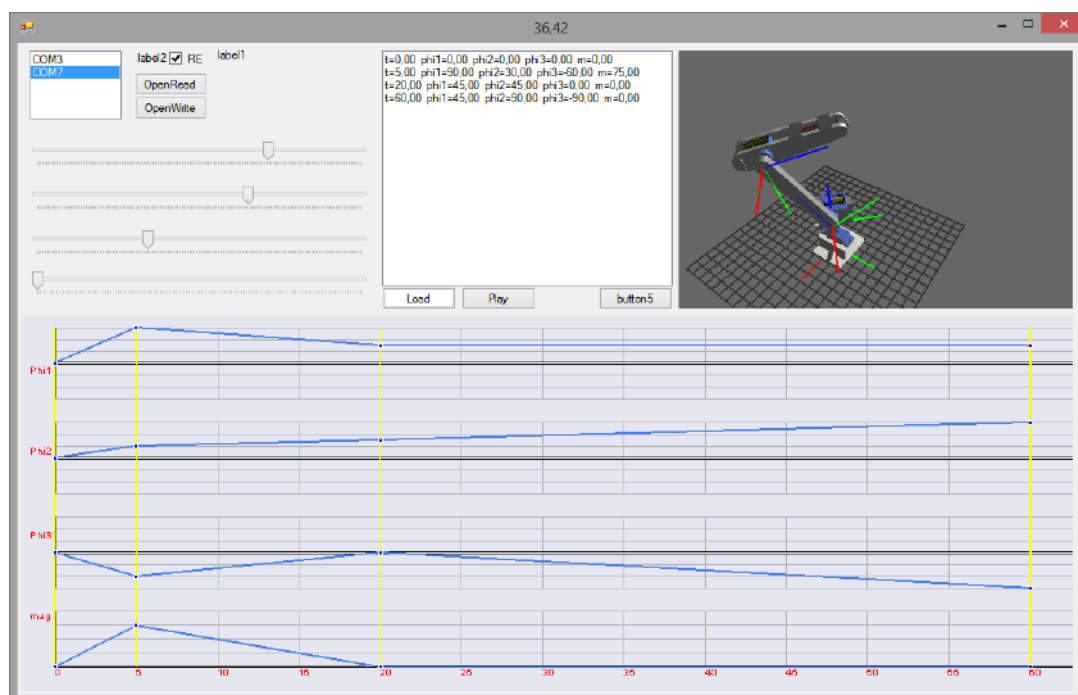


Рисунок 4 – Временные диаграммы

Результаты и обсуждение

В ходе разработки прототипа получены следующие результаты:

- разработана система управления: главная программа и программа для микроконтроллера;
- разработано программное обеспечение, которое реализует метод решения обратной задачи кинематики;
- изготовлен прототип, позволяющий апробировать и доработать некоторые технические решения.

Следует признать, что не проработанными пока остаются вопросы динамики робота-манипулятора. Именно их решение является ближайшей задачей в рамках проводимой работы.

Выводы

Используя данный результат, можно выработать навык по работе с промышленными роботами. Кроме того, заложен фундамент для создания робота манипулятора, характеристики которого будут соответствовать требованиям производства. В ходе дальнейших НИ-ОКР по представленной тематике предполагается создание промышленного образца.

Список литературы

1. Механика промышленных роботов: Учеб. пособие для втузов: В 3 кн./ Под ред. К.В. Фролова, Е.И. Фролова Е.И. Воробьева. Кн 1: Кинематика и динамика/ Е.И. Воробьев, С.А. Попов, Г.И. Шевелева. – М.: Высш. шк., 1988. – 304 с.: ил

DEVELOPMENT OF A SMALL ROBOT MANIPULATOR LIMITED WORKSPACE

Cherdantsev P.O., e-mail: p004092@mail.ru

Cherdantsev A.O., e-mail: hypertigr@mail.ru

Zhivotikova O.E., e-mail: zhivotikova@outlook.com

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

Abstract

The results of research and development work on the creation of a prototype of a robot manipulator with a limited working area are presented. To describe the positions of the device links, the inverse kinematics problem is solved. Servos are used as motors. An electromagnet was chosen as the executive body. The design of the device is described, the general principles of its programming are outlined. Programming is carried out on the principle of key frames, in which some key positions of the manipulator links are set. At intermediate intervals, the coordinate values are calculated using interpolation.

Keywords: robot manipulator, positioning, robot control system, inverse problem of manipulator kinematics.

УДК 625.76.08

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ,
ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО ПОЛЯ И ПОТОКИ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ**

*ЧИЖИК Сергей Антонович¹, доктор техн. наук, профессор, академик,
chizhik @presidium.bas-net.by*

*ВИТЯЗЬ Петр Александрович², доктор техн. наук, профессор, академик,
vityaz@presidium.bas-net.by*

*ХЕЙФЕЦ Михаил Львович^{3,4} доктор техн. наук, профессор,
e-mail: mlk-z@mail.ru*

*КРУТЬКО Вячеслав Сергеевич⁴,
vkrutko@npo-center.com*

*ГРЕЦКИЙ Николай Леонидович⁴,
ngretskiy@npo-center.com*

¹Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь

³Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

⁴ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация

Рассмотрено использование критериев переноса для анализа процессов формирования структур и фаз многократно сокращающее объем экспериментальных исследований при проектировании технологического оборудования, использующего поля и потоки энергии. Предлагается при управлении источниками энергии использовать соотношения, пропорциональные критериям тепло- и массопереноса, электро- и физико-химического взаимодействия. Показано, что модель совместных электромагнитных и термомеханических воздействий при проектировании технологического оборудования базируется на критериях тепло-, и массопереноса, электро-, и физического взаимодействия и определяет основные технологические факторы, связывает геометрические и физико-технические параметры качества с производительностью обработки.

Ключевые слова: проектирование комплексов, технологическое оборудование, потоки и поля энергии, структурообразование в материале и на поверхности изделия.

Введение

Широко применяемые в мировом производстве традиционные и новые высокоэффективные технологии, в том числе и для аддитивного производства позволяют заключить, что наиболее перспективно применение оборудования по наращиванию слоев и формообразованию поверхностей изделий, использующего различные сочетания материалов и источников энергии [1, 2]. Цель по созданию высокоэффективных технологий и оборудования, в свою очередь ставит задачи по распределению компонентов материалов, потоков и полей энергии не только по заданному контуру или поверхности, но и по глубине от поверхности изделия, а также по характеру импульсов подачи энергии и материала [3 - 6].

Анализ критериев подобия при проектировании технологического оборудования

Особенности проектирования комплексов технологического оборудования, использующего потоки и поля энергии, заключаются в том, что согласно критериям тепло- и массопереноса устанавливается последовательность структурообразования в обрабатываемом материале и на формируемой поверхности при увеличении мощности воздействий [1 - 3, 7]:

$$\begin{array}{c}
 \boxed{
 \begin{array}{c}
 (Re\ In) \quad \boxed{(Re\ In)} \\
 Pe(1/Pr) \Rightarrow Re(Pr\ Ds) \Rightarrow Mr(Re/Pr) \cdot (In/Ds) \Rightarrow Gr(Pr) \Rightarrow Rl \\
 (Ds) \quad \quad \quad (Re\ In/Ds)
 \end{array}
 }
 \end{array}
 \quad (1)$$

в которой

$$Pe = \frac{vt}{\omega} - \text{критерий Пекле};$$

$$Pr = \frac{v}{\omega} - \text{критерий Прандтля};$$

$$Re = \frac{\omega vt}{v} - \text{критерий Рейнольдса};$$

$$In = \beta g \nabla T \frac{t^2}{v^2} - \text{отношение подъемной силы плавучести к инерционной силе};$$

$$Ds = \sigma_k \nabla T t \left(\frac{\rho}{v} \right) - \text{отношение сил капиллярности и вязкости};$$

$$Mr = \sigma_k \nabla T \frac{t^2}{(\rho \omega v)} - \text{критерий Марангони};$$

$$Gr = \beta g \nabla T \frac{t^4}{v^2} - \text{критерий Грасгофа};$$

$$Rl = \beta g \nabla T \frac{t^4}{(\omega v)} - \text{критерий Рэлея};$$

где t – характерный размер; ω – коэффициент температуропроводности; v – скорость; ν – коэффициент кинематической вязкости; β – коэффициент объемного расширения; g – ускорение свободного падения; T – абсолютная температура; σ_k – коэффициент термокапиллярности; ρ – плотность технологической среды.

Критерии массопереноса, характеризующие незатопленные струи с большой кинетической энергией в средах с высоким сопротивлением [2, 3, 7]:

$$Re(ReM) \Rightarrow We, \quad (2)$$

в которых

$$M = v^2 \rho / t \sigma - \text{критерий распада струи};$$

$$We = \rho V^2 t / \sigma - \text{критерий Вебера},$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения на границах раздела сред.

Критерии, характеризующие поля и потоки энергии, при электрофизической обработке оказывают существенное влияние на последовательность поверхностных явлений и помогают управлять формированием свойств обрабатываемого материала [2, 3, 7]:

$$Sm\left(\frac{Em}{Se}\right) \Rightarrow Si \quad \text{и} \quad Mr(Ek) \Rightarrow E\left(\frac{Tk}{Ek}\right) \Rightarrow Rl, \quad (3)$$

в которых:

$$Sm = \frac{IB}{(v^2 \rho t)} - \text{критерий магнитного воздействия};$$

$$Em = \frac{vE_1}{(H'B)} - \text{отношение скорости потока к его теплосодержанию и напряженности электрического поля к его магнитной индукции};$$

$$Se = \frac{E_1 t^2}{(IR)} - \text{критерий напряженности электрического поля};$$

$$Si = \frac{I^2 R}{(v \rho H' t^3)} - \text{энергетический критерий};$$

$$Ek = \frac{\varepsilon \gamma^2 \nabla T}{\sigma_k} - \text{отношение термоэлектрической и капиллярной сил};$$

$$E = \frac{\varepsilon \gamma^2 \nabla T^2 t^2}{(\rho \omega v)} - \text{термо-электрический критерий};$$

$$Tk = \frac{\rho \beta g t^2}{\sigma_k} - \text{отношение подъемной силы плавучести к капиллярной силе};$$

где I – сила тока; B – магнитная индукция; H' – энтальпия потока; R – электросопротивление; ε – диэлектрическая проницаемость; γ – коэффициент термоэлектродвижущей силы; E_1 – напряженность электрического поля.

При изучении термомеханических явлений в процессах электрофизической обработки целесообразно использовать критерии Пекле (Pe) и Рейнольдса (Re) [1, 2].

Критерий Пекле характеризует отношение количества теплоты, отводимого конвекцией и путем теплопроводности, и определяет, является ли данный источник теплоты быстродвижущимся [8, 9].

Критерий Рейнольдса описывает переход ламинарного движения обрабатываемого материала в турбулентное течение, Re представляется произведением $Pe \cdot Pr$, в котором критерий Прандтля (Pr) характеризует способность теплоты распространяться в данной среде [1, 3, 8, 9].

Для описания процессов тепломассопереноса при использовании концентрированных потоков энергии применяются критерии, характеризующие поверхностные и пространственные движения потоков вещества [1, 2, 7].

Поверхностные течения вследствие проявления термокапиллярных явлений, порожденных зависимостью поверхностного натяжения от температуры, описываются критерием Марангони (Mr) [1, 3, 8, 9].

Критерий Грасгофа (Gr) характеризует ротацию потока, учитывающую влияние естественной конвекции, при свободном движении потоков жидкости внутри формируемого слоя [1, 3, 8, 9].

Образование в объеме расплавленного слоя силой плавучести пространственно-периодической системы тороидальных вихрей представляется критерием Рэлея (Rl) [1, 3, 8, 9].

Переход при истечении струи жидкости от осесимметричного к волнообразному распаду, а затем к турбулентному распылу, описывается критериями распада (M) и Вебера (We) [2, 3, 7].

При оптимизации электрофизических процессов по параметрам формирующихся структур для управления источниками энергии используются критерии, характеризующие электромагнитные потоки [1 -3, 5].

Выводимый из уравнения энергии критерий Si показывает соотношение между джоулевой теплотой и кинетической энергией потока.

Критерий магнитного взаимодействия Sm необходим при обобщении электрических характеристик источников энергии с магнитным управлением электрической дугой.

Критерий Sm получается из уравнения импульсов $Pt = \rho V$ и раскрывает соотношение между электромагнитной и инерционной силами.

Критерий напряженности электрического поля Se вытекает из закона Ома и описывает проводимость рабочей зоны.

Соотношение критериев магнитного взаимодействия Sm и напряженности электрического поля Se дает выражение, аналогичное энергетическому критерию Si и связывает отношения удельного электросопротивления рабочего зазора R/t к кинетической энергии потока ρV^2 и силы тока I к длине разрядного промежутка t .

Использование последовательностей критериев переноса (1) - (3) для анализа процессов образования структур и фаз материала и поверхности многократно сокращает объем экспериментальных исследований при проектировании технологического оборудования, использующего поля и потоки энергии.

Проектировании технологического оборудования, использующего источники энергии

Предложенные последовательности критериев переноса (1) - (3) применялись при проектировании технологического оборудования, использующего традиционные и новые высокоэффективные технологии, в том числе и для аддитивного производства.

Последовательности критериев тепло- и массопереноса (1) позволили спроектировать раскройное и сварочно-сборочное оборудование, реализующее технологии аддитивного производства при использовании плазменных источников энергии.

Так на ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси спроектировано оборудование с пятикоординатным манипулятором для листового раскроя, в том числе с разделкой кромки заготовки под углом по заданному контуру (рис. 1).

Дооснащение технологического комплекса плазменного раскроя материала сварочной головкой дает возможность реализовать послойную сборку и сварку изделия и тем самым реализовать технологию аддитивного производства (рис. 2).



Рисунок 1 – Технологический комплекс плазменного раскроя материала с Манипулятором для резки и разделки кромок заготовок под углом

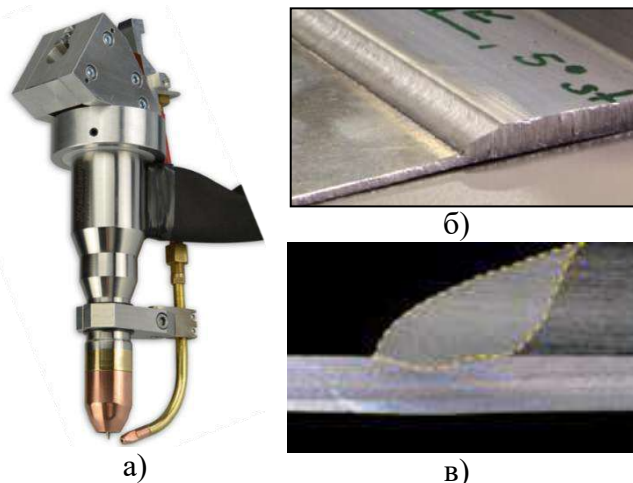


Рисунок 2 – Оборудование для плазменной сварки: а) сварочная головка Kjellberg; б) послойная сварка изделия; в) сечение сварочного шва (информация с сайта www.kjellberg.de)

Использование критериев переноса (2) позволило спроектировать на ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси оборудование для гидроабразивной резки (рис. 3) и расширить круг его возможностей за счет применения пятикоординатного манипулятора (рис. 4).



Рисунок 3 – Технологический комплекс гидроабразивной резки

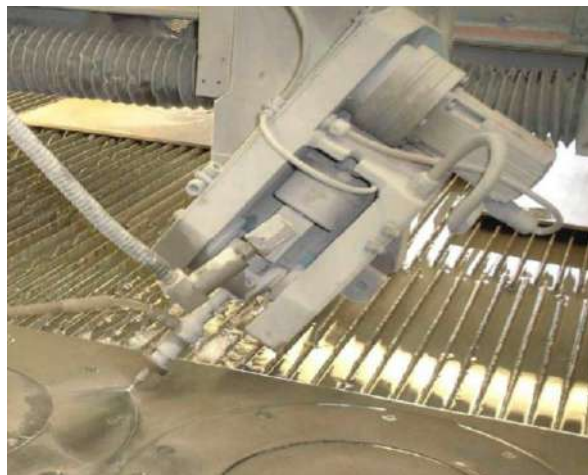


Рисунок 4 – Поворотная система сопла гидроабразивной резки

Применение последовательности критериев электро- и физико-химического взаимодействия (3) дало возможность спроектировать оборудование для магнито-абразивной обработки и электромагнитной наплавки сложнопрофильных поверхностей в ферро-порошковой среде, управляемой электромагнитным полем (рис. 4).

Это позволило как обрабатывать, так и упрочнять сложнопрофильные поверхности изделий в аддитивном производстве, сглаживая как абразивной обработкой, так и заполнением расплавом порошка, образованные при послойном синтезе ступеньки.



Рисунок 5 – Дозирующее устройство с импульсным полюсным наконечником для подачи ферропорошка



Рисунок 6 – Импульсный полюсный наконечник с образовавшимися под действием электромагнитного поля цепочками ферропорошка

Выводы

Модель совместных электромагнитных и термомеханических воздействий при проектировании технологического оборудования базируется на критериях тепло-, и массопереноса, электро-, и физико-химического взаимодействия и определяет основные технологические факторы, связывает геометрические и физико-технические параметры качества с производительностью обработки.

Обеспечение условий самоорганизации процессов формирования поверхностного слоя, согласно критериям переноса в открытых технологических системах при совместных воздействиях позволяет посредством стабилизации электрофизических и термомеханических процессов управлять эффективностью и качеством обработки.

Список литературы

1. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М.Л. Хейфец. – М.: Машиностроение, 2005. – 272с.
2. Васильев, А.С. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко, Л.Г. Полонский, М.Л. Хейфец, П.И. Ящерицын. – М.: Машиностроение, 2003. – 256с.
3. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларуская навука, 2012. – 239с.
4. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларуская навука, 2014. – 316с.
5. Автоматизация и управление в технологических комплексах / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларуская навука, 2014. – 375с.
6. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / С.А. Чижик [и др.]; под общ. ред. М.Л.Хейфеца. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 248с.
7. Эбелинг, В. Образование структур при необратимых процессах: введение в теорию диссипативных структур / В. Эбелинг. – М.: Мир, 1979. – 279 с.
8. Телегин, А.С. Тепломассоперенос / А.С. Телегин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – М.: Металлургия, 1995. – 400 с.
9. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.

DESIGN OF PROCESS EQUIPMENT USING FIELDS AND ENERGY FLOWS BASED ON ANALYSIS OF SIMILARITY CRITERIA

Chizhik S.A.¹, D.Sc. (Engineering), Professor, Acad, chizhik @presidium.bas-net.by

Vitiaz, P.A.², D.Sc. (Engineering), Professor, Acad, vitiaz@presidium.bas-net.by

Kheifetz M.L.^{3,4}, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mlk-z@mail.ru

Krutko V.S.⁴, vkrutko@npo-center.com

Gretskiy N.L.⁴, ngretskiy@npo-center.com

¹ A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus NAS of Belarus, Minsk, Belarus

² Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

³ Institute of Applied Physics NAS of Belarus, Minsk, Belarus

⁴ Open Joint Stock Company «NPO Center» NAS of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract

The use of transfer criteria for the analysis of the processes of formation of structures and phases is considered, which greatly reduces the amount of experimental research in the design of technological equipment using fields and energy flows. It is proposed to use ratios proportional to the criteria of heat and mass transfer, electro- and physicochemical interaction when controlling energy sources. It is shown that the model of combined electromagnetic and thermomechanical effects in the design of technological equipment is based on the criteria of heat and mass transfer, electrical, and physical interaction and determines the main technological factors, connects geometric and physical and technical quality parameters with processing performance.

Keywords: design of complexes, technological equipment, energy flows, structure formation in the material and on the surface of the product.

УДК

К ВОПРОСУ НАЛИЧИЯ СТУКА ПРИ РАБОТЕ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ

*ЩУКИН Сергей Геннадьевич¹, канд.техн.наук, доцент,
e-mail: shykin.sergei@mail.ru*

*ЧУСОВИТИН Николай Анатольевич², канд.техн.наук., доцент,
e-mail: choos328@mail.ru*

*КОНЦЕВОЙ Анатолий Васильевич³, директор ООО «Ферм-Технологии»,
e-mail: anadro@mail.ru*

¹Новосибирский Государственный Аграрный Университет, 630099,
Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 160

²Новосибирский Государственный Технический Университет, 630073,
Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

³ООО «Ферм-Технологии», 630007, Российская Федерация, г. Новосибирск,
ул. Фабричная, 10

Аннотация

Рассмотрено устройство инерционных вибровозбудителей планетарного типа. Экспериментально при работе вибровозбудителя был выявлен стук, что указывает на наличие жёсткого контакта бегуна с корпусом – удар, при котором часть механической энергии расходуется на генерацию звуковых колебаний. Обнаружив область контакта неуравновешенной массы с корпусом вибровозбудителя, можно управлять процессом возбуждения ударного действия бегуна на корпус, технологическим процессом разрушения антропогенно-переуплотнённой почвы.

Ключевые слова: Вибровозбудитель, неуравновешенная масса, воздействие на почву.

Введение

В 2016 году в продолжение работ И.Н. Петрягина [1] по совершенствованию конструкции вибровозбудителя было разработано и запатентовано устройство С.Г. Щукина [2], имеющее ряд оригинальных конструктивных решений. Устройство содержит: цилиндрический корпус 1, внутри которого расположено смещённое от центра корпуса ведущее звено; ведущее звено 2 - вал-ротор, ось вращения которого смещена относительно центра корпуса, а его шейки опираются на подшипниковые узлы боковых крышек корпуса; 3 – бегун, свободно перемещается по сегментному пазу вала-ротора и перекачивается по внутренней поверхности корпуса.

По внешнему виду корпуса 1 можно вынести суждение об интенсивном контакте деталей между собой, а именно: поверхность корпуса (рис. 1) имеет четко выраженные области взаимодействия с бегуном.

Научная проблема – разработать технологический приём направленного действия неуравновешенной массы для возбуждения вибрационных колебаний системы.

Цель работы – совершенствование процесса возбуждения вибрационных колебаний направленным действием неуравновешенной массы.

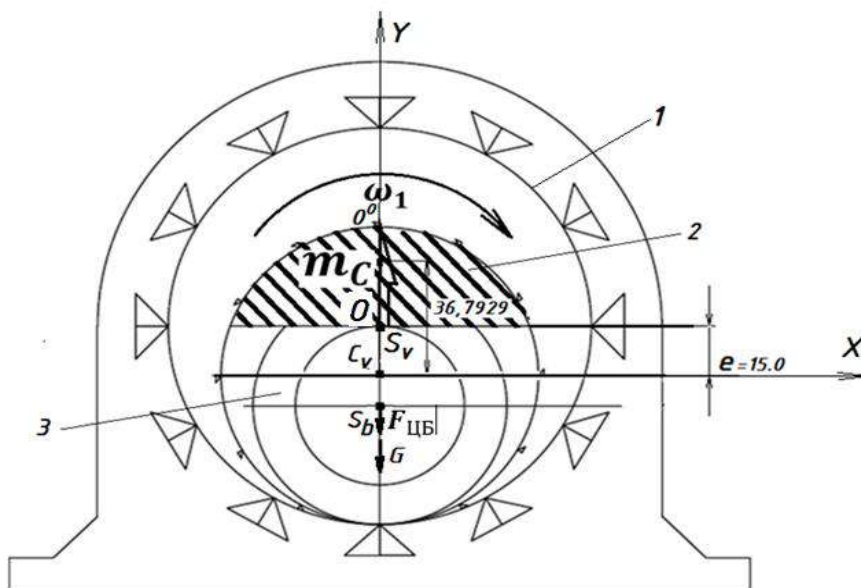


Рисунок 1 – Схема вибровозбудителя, патент РФ № 2578745 от 27.03.16.

Объект исследования – процесс возбуждения вибрационных колебаний в зависимости от характера перемещения неуравновешенной массы при воздействии на корпус.

Предмет исследования – выявление характера поведения неуравновешенной массы на возбуждение механического вибрационного колебания, места приложения наибольшего воздействия сил на корпус вибрационного возбудителя.

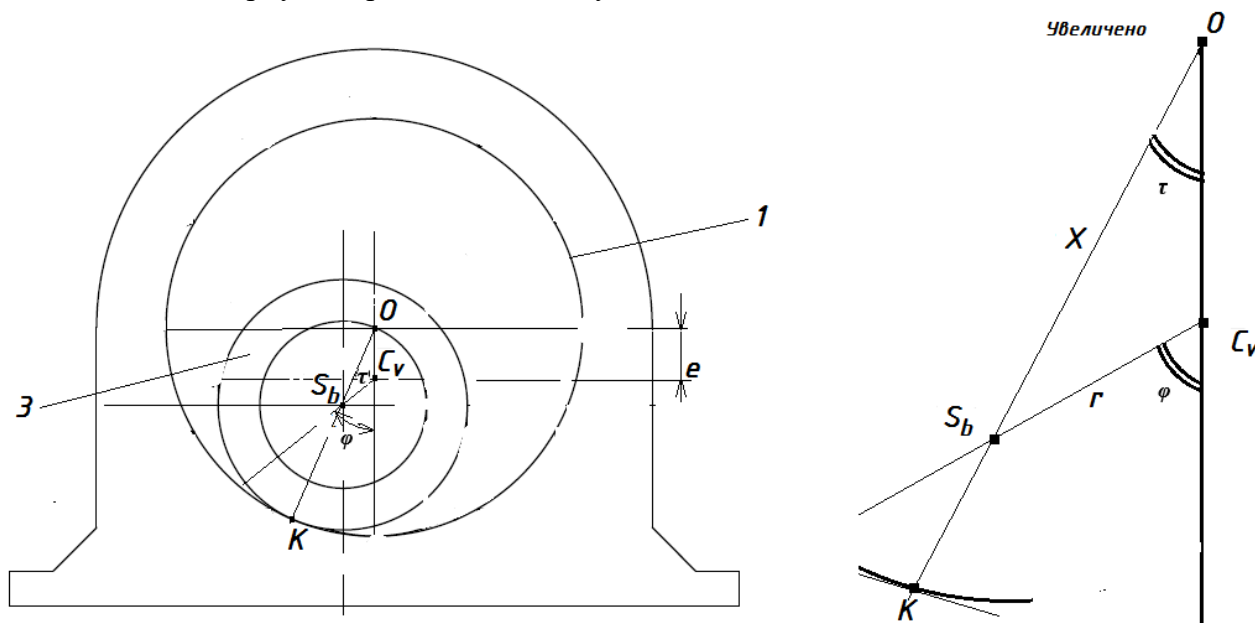


Рисунок 2 – Картина кинематических параметров механизма, при синтезе условия безотрывного движения бегуна (существования кинематической пары K)

Анализ положений проведен с учетом особенностей перемещения бегуна 3 (рис. 2), таких как: переносное движение вокруг неподвижной оси O , относительное вращение вокруг C_v и относительное перемещение вдоль направляющих ведущего звена. При анализе был уч-

тен ряд величин: R – радиус рабочей цилиндрической поверхности корпуса, по которой движется бегун 3, местоположение K – высшей кинематической пары бегун- корпус, r – расстояние $C_V S_b$ от центра массы бегуна до центра вращения ведущего звена 2; e – эксцентриситет; частота вращения ведущего звена 2, принятая в экспериментальной части $n_1 = 750$ об/мин, φ – угол поворота бегуна вокруг центра C_V .

Поскольку в механизме экспериментально установлено размыкание бегуна и корпуса, необходимо установить параметрическое условие существования высшей кинематической пары K .

Принимая то, что линия касания K бегуна 3 и внутренней поверхности вибровозбудителя с центром в O располагается на прямой OK , проходящей через центр S_b бегуна 3 (рис.2), условие безотрывного движения бегуна реализуется если величина $S_b O$ в любой точке касания 3 с внутренней поверхностью вибровозбудителя является константой. Т.е. центр масс бегуна движется по эквидистанте по отношению к корпусу. Указанный размер $S_b O$ зависит от угла поворота φ ведущего звена 2, параметра $r=C_V S_b$ и определяется условием

$$X = \sqrt{(e^2 + 2 * r * \cos \varphi + r^2 * \cos^2 \varphi + r^2 * \sin^2 \varphi) = \sqrt{e^2 + 2 * r \cos(\varphi) + r^2}}$$

Предварительно определено фактическое положение центра бегуна S_b относительно C_V с учетом приращения угла поворота [3]:

$$r_{i1} = r_i + \frac{(\omega^2 r_i + g \cdot \cos \varphi) \Delta t^2}{2}$$

где $g = 9.81$ м/с².

Теоретически возможная траектория движения линии контакта K бегуна 3 и корпуса с шагом угла поворота ведущего звена 2, равным $\varphi = 0.1745$ рад. (10°), показана на рис. 3.

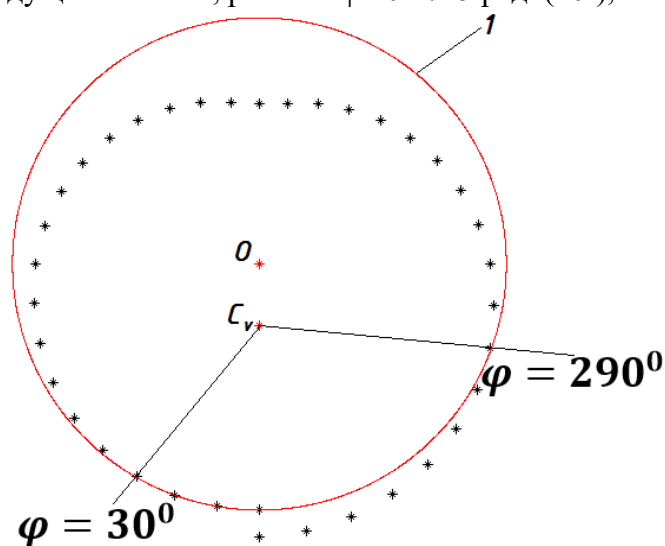


Рисунок 3 – Теоретическое положение линии контакта K в зависимости от угла поворота бегуна вокруг центра вращения C_V

Таким образом, высшая кинематическая пара K существует на интервале от 290° до 30° при движении ведущего звена 2 по часовой стрелке.

Если положение K находится внутри окружности, изображающей корпус 1, то траектория перемещения центра бегуна [4] указывает на действие силы недостаточной величины, и напротив, если K расположена за пределами корпуса, то действие центробежной силы приводит к возникновению контакта бегуна и корпуса, передачи колебаний на рабочий орган. Отметим, что существенная часть поверхности, приходящаяся на угол поворота ведущего звена 2 от 30° до 290° не участвует в работе. Нарушается технологический режим воздействия рабочего органа на почву.

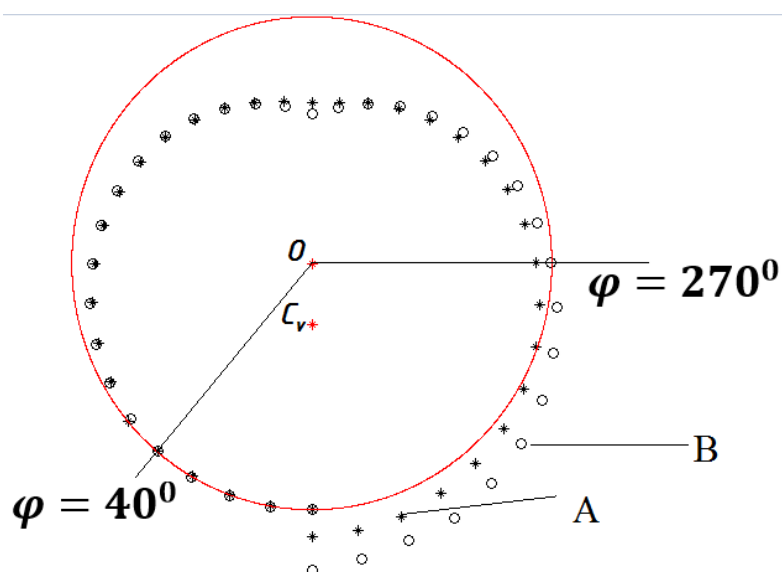


Рисунок 4 – Графическая иллюстрация условия существования кинематической пары K

На рис. 4 показаны местоположения элемента к.п. K с установленным угловым шагом, при частотах вращения звена 2, равных $n_1=750$ об/мин, опыт A ; и при $n_2=1000$ об/мин, соответственно B .

Установлено, что с увеличением частоты вращения ведущего звена границы взаимодействия бегуна и корпуса расширяются, но не значительно. Так для эксперимента B они составляют интервал $270^\circ < \varphi < 40^\circ$. Т.е. увеличение частоты вращения ведущего звена не вносит существенного вклада в расширение границ возникновения вибраций.

Выводы

1. Несмотря на высокую частоту вращения детали гладкой выпуклой формы имеют центробежную силу, недостаточную для контакта неуравновешенной массы бегуна 3 с поверхностью корпуса 1, вследствие чего рабочей является только часть поверхности.

2. Увеличение частоты вращения при данном эксцентриситете не приводит к полному обкатыванию корпуса 1 бегуном 3. Характер работы вибровозбудителя сопровождается интенсивной звуковой волной, что вызвано отрывом бегуна 3 от корпуса, его интенсивным разгоном, после которого бегун 3 ударяется о корпус с частичной потерей мощности на создание звуковых колебаний. Генерация колебаний носит прерывистый характер.

3. Следует изменить геометрию корпуса с целью реализации непрерывного контакта бегуна с ним, что позволит в полной мере реализовать требуемый технологический процесс [5].

Список литературы

1. А.с. 1681979 СССР, МКИ³В06 В 1/16. Вибровозбудитель /И.Н. Петрягин (СССР). - № 4386471/28; заявл. 02.03.88 ;опубл. 07.10.91. Бюл. №37 – 2 с. : ил.
2. Патент РФ на изобретение № 2578745, В06В1/16. Вибровозбудитель / Шукин С. Г., Альт В. В., Нагайка М. А., Вальков В. А. – № 2014150703/28, Заявл. 15.12.2014, опубл. 27.03.2016. Бюл. № 9. – 6 с.
3. И.Н. Петрягин Определение мощности вибровозбудителя Сибирский Вестник сельскохозяйственной науки, №1, 1984, стр. 80 – 84 ISSN 0370-8799
4. Калентьев В.А. Центр тяжести. /Калентьев В.А., Калинин В.М., Раевская Л.Т., Чашин Н.И. Метод. указания по выполнению расчётно-графических работ с вариантами заданий для студентов очной и заочной формы обучения. Урал. лесотехн. ун-т. - Екатеринбург: УГЛТУ, 2006. - 19 с. : ил.
5. McCONNELShakaerator Features [Электронныйресурс]. Режим доступа:www.highland-agriculture.com.

УДК 621.91.02

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СБОРНЫХ РЕЗЦОВ ОСНАЩЕННЫХ СМЕННЫМИ РЕЖУЩИМИ ПЛАСТИНАМИ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ ЭИ867-ВД

*АРТАМОНОВ Евгений Владимирович, доктор техн. наук, профессор,
e-mail: EvgArt2014@mail.ru*

*ТВЕРЯКОВ Андрей Михайлович, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: tveryakov@mail.ru*

*ШТИН Антон Сергеевич, кандидат техн. наук,
e-mail: shtin_as@mail.ru*

Тюменский индустриальный университет, 625000, Российская Федерация, г. Тюмень,
ул. Володарского, 38

Аннотация

Сегодня в условиях санкций Российская федерация как никогда раньше нуждается в развитии энергосберегающих технологий в различных отраслях промышленности.

Наибольшее влияние на ресурс и работоспособность режущих инструментов из твердых сплавов оказывают физико-механические свойства инструментальных материалов. Исследования показали, что физико-механические свойства вольфрамовых твердых сплавов в процессе работы, а именно в процессе резания труднообрабатываемых материалов под действием высоких температур симметрично изменяются.

В основу данного исследования легли законы физики раздела электродинамики, а также известные методики неразрушающего контроля, научные основы материаловедения, все исследования проводились в аккредитованных лабораториях Тюменского индустриального университета.

Получены результаты исследования по определению температуры максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин на основе исследования изменения электромагнитных свойств. На основе стойкостных испытаний в заводских условиях было доказано, что разработанная методика позволяет определять температурные интервалы максимальной работоспособности на основе исследования изменений электромагнитных свойств твердых сплавов.

Ключевые слова: резцы, твердые сплавы, повышение эффективности, работоспособность, лезвийная обработка.

Введение

На территории Тюменской области производят капитальный и аварийный ремонт газотурбинных двигателей, которые используют для перекачки газа. Как известно в их конструкции применяется большое количество труднообрабатываемых жаропрочных материалов. Исследования показали, что выбор инструментального материала, а также назначении режимов обработки (резания) – являются основными проблемами, при обработке сталей и сплавов входящих в группу труднообрабатываемых материалов [1]. Решение проблемы выбора технологических параметров процесса резания позволяет построить энергоэффективный процесс производства и ремонта деталей машин.

При назначении режимов резания для новых материалов инструментальные фирмы проводят испытания на разрушение сменных режущих пластин при резании, полученные численные значения публикуются в каталогах [2]. Но как показывает практика данные численные значения не всегда соответствуют оптимальным режимам резания. На практике режимные условия для инструмента разделены по группам обрабатываемости [3].

В своих работах проблему обеспечения наиболее полного ресурса режущего инструмента с различных позиций изучали: Васин С.А. [2], Григорьев С.Н. [3], Carceanu, I., Cosmeleatǎ, G. [4], Ferri, C. [5], Kmmel, J. [6], Munish Kumar Gupta [7], Murthy, K.S. [8], Neugebauer, R. [9], Jaafar I. [10], Tangjitsitcharoen S. [11], Patwari A. [12], Tillmann, W. [13], Zhang, H. [14], Zhang C. L. [15].

Литературный анализ работ, ученых с мировым именем в области механической лезвийной обработки металлов резанием, показал, что температурный фактор оказывает результирующее влияние на процесс резания труднообрабатываемых материалов. [2-17].

Исследования показали, что физико-механические свойства вольфрамовых твердых сплавов в процессе работы, а именно в процессе резания труднообрабатываемых материалов под действием высоких температур симметрично изменяются [17]. Изучение процессов протекающих внутри инструментальных материалов, в том числе вольфрамовых твердых сплавов позволит на основе научно обоснованной методики определять и назначать режимы работы данного материала с учетом его внутренних изменений, что повысит ресурс режущего инструмента и обеспечить условия при которых режущий инструмент будет обладать максимальными режущими свойствами при обработке труднообрабатываемых материалов.

Цель работы: Определение скорости резания, обеспечивающей максимальный ресурс работы сменных режущих пластин из вольфрамового твердого сплава В35 при токарной обработке хромоникелиевого сплава ЭИ867-ВД, на основе исследования изменения электромагнитного поля вихревых токов возникающих в сменных режущих пластинах при изменении температуры.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **задачи:**

1. Выполнить литературный обзор, а также провести анализ существующих работ, посвященных проблемы рационального выбора инструментального материала, а также назначения режимов резания.
2. Провести исследования механики процесса резания при токарной обработке труднообрабатываемой хромоникелиевой стали ЭИ867-ВД на разных скоростях резания резцами оснащенными сменными режущими твердосплавными пластинами из твердого сплава В35.

Методика исследований

Работоспособностью режущих инструментов принято считать условия, при которых инструменты способны выполнять обработку резанием, важно, с установленными требованиями в установленных условиях [17].

Исследования проводились следующим образом: производился нагрев образца, в нашем случае образец представляет собой сменную режущую твердосплавную пластину в состоянии поставки, затем бесконтактным методом, наводится магнитное поле на исследуемый образец. На измерительном приборе (вольтметре), разработанной установки, фиксируются изменения значений, свидетельствующих о внутренних изменениях твердого сплава. Результаты выводятся на экране монитора персонального компьютера.

Результаты и их обсуждение

По результатам экспериментальных исследований были составлены таблицы полученных результатов.

При помощи возможностей математического аппарата программного продукта MS Excel, были построены полиномиальные зависимости полученных данных от температуры нагрева, рисунок 1. Температурный интервал (Т) рисунок 1, в котором производились экспериментальные исследования, соответствует температурному интервалу характерному для процесса резания.

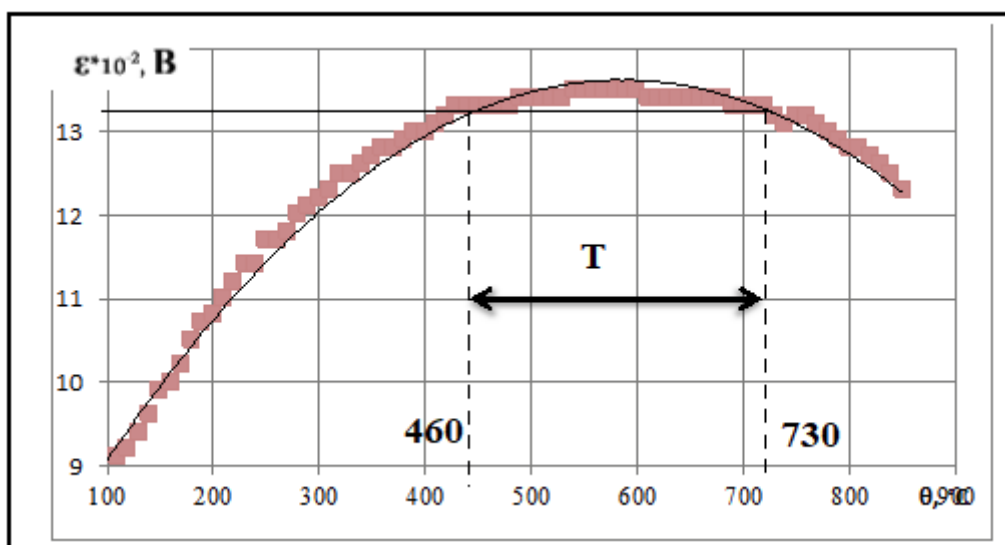


Рисунок 1 – Полученная однопараметрическая зависимость изменения значений ЭДС АК под действием температур во время эксперимента на сменных режущих пластинах из сплава В35

Fig. 1. The obtained one-parameter dependence of change of EMF values under the influence of temperatures during the experiment on replaceable alloy cutting plates B35 (92%WC+8%Co)

Для определения границы температурного диапазона используется специальная методика. От значения максимального магнитного поля откладывается 5 процентный интервал. Через данную точку проводится линии параллельная оси температур через все поле графика. Точки, где линия пересекается с линией, графика принимаем за границы искомого интервала. Из полученных точек проводим проекционные линии на ось температур. Полученный температурный интервал принимаем за интервал максимального ресурса сменных режущих пластин из твердого сплава В35. Допускается использование инструмента во всем температурном интервале, но рекомендуется, с технологической точки зрения, придерживаться максимальной температуры, так как она обеспечивается максимально допустимую скорость резания.

На рисунке 2 представлены зависимости температуры резания, пути резания и относительного поверхностного износа инструмента. По характеру данных зависимостей мы можем сказать, что в определенном интервале температур наблюдается минимум относительного поверхностного износа и максимум пути резания, что доказывает адекватность разработанной методики. Каждая точка на графиках представляет собой среднее арифметическое значение полученных значений, в результате не менее 3 измерений.

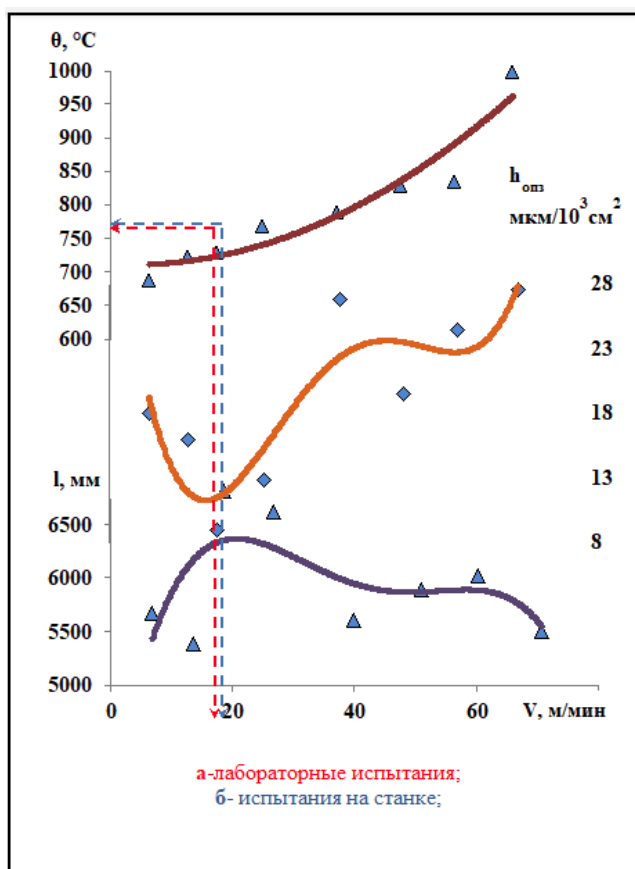


Рисунок 2 – Зависимости температуры резания (θ), пути резания до отказа (L), относительного поверхностного износа ($h_{\text{опз}}$), от скорости резания (V), (обрабатываемый материал ЭИ867-ВД, инструментальный материал В35, $S=0,39$ мм/об, $t=1$ мм)

Fig. 2. Dependencies of cutting temperature (θ), cutting path to failure (L), relative surface wear (h_{tw}), cutting speed (V), (material to be treated EI867-VD (57%Ni9%Mo10%Cr6%W4.2%Al4%Co), tool material В35 (92%WC+8%Co), $S = 0.39$ mm/n, $t = 1$ mm)

На полученных зависимостях в лабораторных условиях изменение направления значений ЭДС соответствует структурным изменениям первого фазового перехода кобальта. До этих значений наблюдается рост значений прочности твердого сплава, что и обеспечивает условия максимальной работоспособности инструмента, что подтверждается при исследовании механики процесса резания при токарной обработке хромоникелевого сплава ЭИ867-ВД.

Выводы

Исследование показало, что при токарной обработке хромоникелиевого сплава ЭИ867-ВД скорость резания, обеспечивающая максимальный ресурс работы вольфрамового твердого сплава В35, является 18 м/мин. Это подтверждается минимальной величиной фаски износа сменных режущих пластин по задней поверхности равной 0,225 мм и минимальной величиной относительного поверхностного износа по задней поверхности $h_{\text{опз}}$ 211,97 мкм/103см, полученный при одной температуре резания 730°C. Данная температура входит в

температурный интервал полученный в лабораторных условиях, при исследовании изменений электромагнитного поля вихревых токов, возникающих в твердых сплавах марки В35. Таким образом, данные исследования по изменению структурных изменений твердых сплавов позволят для каждого твердого сплава выявить скорости резания, обеспечивающие их максимальный ресурс или максимальную работоспособность на основании научно-обоснованной методики.

Список литературы

1. Zorev N.N. Untersuchung der Kintakt-spannungser auf den Arbeits-flachen des Werkzeugs miteiner Schneidenabrundung / Zorev N.N., Uteshev M.H. – Berichte der Internationalen Forschungesgemein-schaft fur mechanische produktionstechnik Vol. 20-1 Schweiz, 1971. Pp31-32.
2. Васин С.А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учебник для технических вузов./ С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер – М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с. ISBN: 5-7038-1823-0.
3. Гречишников В.А. Процессы формообразования и инструментальная техника: Учебное пособие / В.А. Гречишников, Н.А. Чемборисов, В.Б. Ступко, Д.Т.Сафаров, О.Б. Кучина, С.Н. Григорьев, А.г. Схиртладзе. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. 328 с. ISBN 978-5-94178-326-7.
4. Lapshin V.V., Machining of linear negative matrices for fresnel lenses and prisms / Lapshin V.V., Zakharevich E.M.,Grubyi S.V. - Russian engineering research Allerton Press, Inc. (New York) Vol. 36.10, 2016 Pp826-830. DOI: 10.3103/S1068798X16100105
5. Carceanu, I., Cosmeleată, G., Ghiban, B., Balanescu, M., Nedelcu, I. High performance composite materials created through advanced techniques. Materiale Plastice Volume 44, Issue 4, 2007, Pages 321-325.
6. Ferri, C., Minton, T. , Ghani, S.B. , Cheng, K. Internally cooled tools and cutting temperature in contamination-free machining. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering ScienceVolume 228, Issue 1, January 2014, Pages 135-145. DOI: 10.1177/0954406213480312.
7. Kümmel, J. Braun, D., Gibmeier, J., Schneider, J., Greiner, C., Schulze, V., Wanner, A. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilization. Journal of Materials Processing Technology Volume 215, January 2015, Pages 62-70. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.07.032.
8. Munish Kumar Gupta, Machining of Aerospace Material - Ti (grade-2) alloy: Modelling and Optimization/ Pardeep Kumar Sood, Gurraj Singh, Vishal S. Sharma Sustainable// Journal of Cleaner Production DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.01.133
9. Murthy, K.S. Rajendran, I. Optimization of end milling parameters under minimum quantity lubrication using principal component analysis and grey relational analysis. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and EngineeringVolume 34, Issue 3, July 2012, Pages 253-261. DOI: 10.1590/S1678-58782012000300005.
10. Neugebauer, R., Hochmuth, C. Schmidt, G., Dix, M. Energy efficient process planning based on numerical simulations. Advanced Materials Research 2011, Volume 223, Pages 212-221, 17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations; Sintra; Portugal; 12 May 2011 до 13 May 2011. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.223.212.
11. Nurulamin A., Jaafar I., Zubaire W. Role of discrete nature of chip formation and natural vibrations of system components in chatter formation during metal cutting// IIUM Engineering Journal. 2010, № 11, P. 124-126.

12. Tangjitsitcharoen S., Moriwaki T. Intelligent monitoring and identification of cutting states of chips and chatter on CNC turning machine // *Journal of Manufacturing Processes*. 2008, №10, P. 40–46. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.043.
13. Patwari A. Investigations of formation of chatter in a non-wavy surface during thread cutting and turning operations // A. Patwari, N. Amin, W. Faris – Text : electronic // *Advanced Materials Research*. 2010, №83, pp. 637–645. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.637.
14. Tillmann, W., Schaak, C., Biermann, D., Abmuth, R., Goeke, S. Robot based deposition of WC-Co HVOF coatings on HSS cutting tools as a substitution for solid cemented carbide cutting tools. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 181, Issue 1, 17 March 2017, № 012011 19th Chemnitz Seminar on Materials Engineering; Chemnitz; Germany; 16 March 2017- 17 March 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/181/1/012011.
15. Zhang, H., Fang, Z.Z., Lu, Q. Characterization of a bilayer WC-Co hardmetal using Hertzian indentation technique. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* Volume 27, Issue 2, March 2009, Pages 317-322. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2008.07.014.
16. Zhang C. L., A hybrid approach of ANN and HMM for cutting chatter monitoring / C. L. Zhang, X. Yue, Y. T. Jiang, – Text : electronic // *Advanced Materials Research*. 2010, №97, pp. 3225–3232. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.3225.
17. Srithar, A., Palanikumar, K., Durgaprasad, B. Experimental investigation and surface roughness analysis on hard turning of AISI D2 steel using coated Carbide insert. *Procedia Engineering* Volume 97, 2014, Pages 72-77 12th Global Congress on Manufacturing and Management, GCM 2014; VIT University Vellore; India; 8 December 2014 - 10 December 2014. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.226.

OPERABILITY OF PREFABRICATED CUTTERS EQUIPPED WITH REPLACEABLE CUTTING PLATES FOR BLADE PROCESSING OF BLANKS MADE OF STEEL EI867-VD

Artamonov E.V., D.Sc. (Engineering), Professor, e – mail: EvgArt2014@mail.ru,
Tveryakov A.M., C. Sc. (Engineering), Associate Professor, e – mail: tveryakov@mail.ru,
Shtin A.S. C. Sc. (Engineering), e – mail: shtin_as@mail.ru.

Tyumen Industrial University, 38 Volodarsky str., Tyumen, 625000, Russian Federation

Abstract

Today, under the conditions of sanctions, the Russian Federation needs the development of energy-saving technologies in various industries more than ever before.

The greatest influence on the resource and performance of cutting tools made of hard alloys is exerted by the physical and mechanical properties of tool materials. Studies have shown that the physical and mechanical properties of tungsten hard alloys change symmetrically during operation, namely during the cutting of hard-to-process materials under the influence of high temperatures.

This study is based on the laws of physics and electrodynamics, as well as well-known methods of non-destructive testing, the scientific foundations of materials science, all studies were conducted in accredited laboratories of the Tyumen Industrial University.

The results of a study on determining the temperature of the maximum operability of replaceable cutting carbide plates based on the study of changes in electromagnetic properties are obtained. On the basis of resistance tests in factory conditions, it was proved that the developed method allows determining the temperature intervals of maximum performance based on the study of changes in the electromagnetic properties of hard alloys.

Keywords: cutters, hard alloys, efficiency improvement, efficiency, blade processing.

СЕКЦИЯ 5

*Упрочняющие
технологии и
функциональные
покрытия*

SECTION 5

*Hardening
technology and
functional
coatings*

УДК 621.787

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДАМИ СВЕРЛЕНИЯ ЗОНДИРУЮЩЕГО ОТВЕРСТИЯ И 2-Х ЭКСПОЗИЦИОННОЙ СПЕКЛ ФОТОГРАФИИ

*МАХАЛОВ Максим Сергеевич, канд. техн. наук, доцент,
e-mail: maxim_ste@mail.ru*

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650026, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Аннотация

Представлена методика определения остаточных напряжений (ОН) методом сверления зондирующего отверстия и 2-х экспозиционной спекл фотографии. Представленная методика позволяет определить распределения касательного и нормальных в плоскости поверхности образца компонент ОН по глубине поверхностного слоя.

Ключевые слова: остаточные напряжения, механическое состояние металла, поверхностный слой, механическая обработка резанием, поверхностное пластическое деформирование (ППД), двухэкспозиционная спекл-фотография, метод сверления зондирующего отверстия.

Введение

Остаточные напряжения (ОН) первого рода – важный параметр механического состояния металла, значительно влияющий на долговечность изделий.

Несмотря на высокую эффективность современных методов моделирования сохраняется необходимость экспериментального измерения остаточных напряжений (деформаций) [1].

Однако, большинство механических методов определения ОН, имеют высокую погрешность (до 40-50%), что наряду с трудоемкостью и необходимостью разрушения изделия является их главными недостатками. Несмотря на это, они получили широкое распространение главным образом потому, что в их основе лежат те же представления о напряжениях и деформациях механики твердого тела, как и при расчетах деталей на прочность, жесткость и устойчивость.

Принципиально, точность механических методов зависит от погрешности, внесенной на стадии механического удаления - «малоинвазивности» способа и погрешности измерения возникших деформаций (перемещений). Целью комбинации методов сверления зондирующего отверстия и метода 2-х экспозиционной спекл-фотографии [2-3] является существенное снижение погрешности обеих составляющих.

Основная идея заключается в фиксации двух систем спеклов: поверхности образца, имеющего остаточные напряжения, и той же поверхности после высокоскоростного (до 50000 об/мин) сверления зондирующего отверстия диаметром 1..3 мм. Последнее вносит относительно небольшие погрешности в механическое состояние исследуемого образца.

Происходящие поверхностные смещения, их величина и направление, обусловлены перераспределением ОН, которые вследствие съема металла вышли из равновесного состояния. По полученным смещениям можно однозначно определить компоненты тензора пласти-

ческой дисторсии исследуемого образца в любой точке и затем, с помощью разработанной для данных условий выполнения эксперимента и представленной ниже методики, рассчитать остаточные напряжения.

Представленная методика основана на работах И.А. Биргера [4]. Значительно позднее ряд отечественных и зарубежных авторов, в том числе [5-6], существенно развили эти идеи, адаптировали методики пересчета значений полученных смещений/деформаций применительно к различным методам их измерения и условиям выполнения экспериментов. Разработаны рекомендации по выбору диаметра, глубины и других режимов сверления отверстий.

Экспериментальный образец в форме параллелепипеда размером 100x30x4 мм жестко устанавливается подвижный стол станка. Спекл-система устанавливается над подвижным столом, закрепляется отдельно в собственной оснастке и направляется вертикально вниз к обрабатываемой поверхности образца размером 150x4 мм. Центр поверхности на размере 4 мм совмещается с центром сверла, закрепленного в станке, при этом сама поверхность устанавливается перпендикулярно оси сверла [7].

Центр поля зрения спекл-системы настраивается на центр будущего отверстия. С целью повышения качества результатов, при съемке исходной картины поверхности выполняется значительное число (1000..2000) кадров.

Далее подвижный стол с образцом смещается на заданное расстояние и осуществляется сверление отверстия на заданную глубину в зоне образца, подвергнутой исходной съемке.

После сверления осуществляется отвод сверла, возврат подвижного стола с образцом в исходное положение, удаление микростружки пылесосом и повторная съемка той же зоны образца с полученным отверстием.

Для измерения распределения ОН по глубине ПС, с учетом рекомендаций, приведенных в [5], на каждом образце выполняется 5 отверстий диаметром 1,7 мм, глубиной 0,2; 0,4; 0,7; 1 и 1,7 мм. Расстояние между центрами соседних отверстий 5 мм (рис. 1).

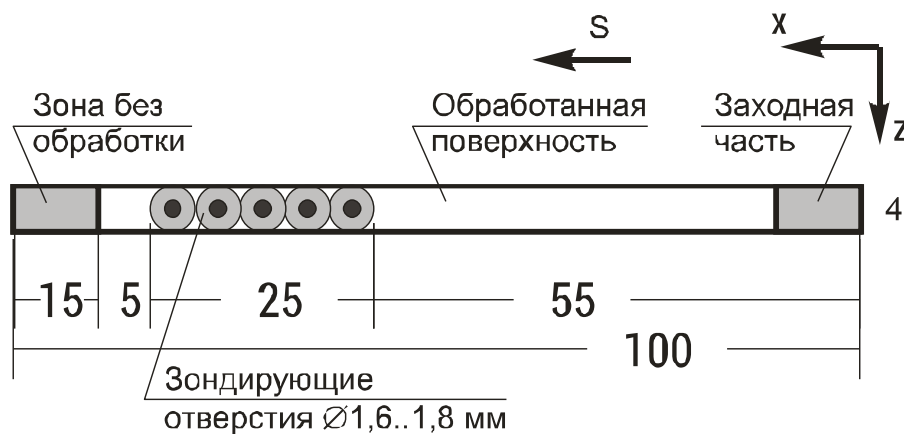


Рисунок 1 – Схема расположения зондирующих отверстий на экспериментальном образце

После вычитания спекл-интерферограмм до и после сверления отверстия и последующей их расшифровки рассчитываются значения векторов смещений точек вокруг отверстия по осям X и Y.

Согласно данным [5] и др., получаемые значения смещений (как и деформаций) достаточно быстро уменьшаются по мере удаления от кромки отверстия. Таким образом, можно принять, что на окружности диаметром 4 мм перемещения отсутствуют.

В соответствии с рекомендациями, приведенными в [5], примем зону определения деформаций и напряжений на расстоянии 0,5...1 мм от кромки отверстия. Т.е. $r = 2,2...2,7$ мм.

Такие значения выбраны, с одной стороны, для исключения влияния краевых эффектов вблизи кромки отверстия, а, с другой, – с учетом интенсивного уменьшения деформаций по мере удаления от кромки.

Относительные радиальные деформации в любой точке вокруг отверстия могут быть определены исходя из значений смещений по обеим координатным осям.

Для определения остаточных напряжений, существовавших в изделии до высверливания отверстия, из имеющихся радиальных деформаций принимаем за основу метод отверстий, описанный в [4] для пластин, находящихся в двухосном напряженном состоянии.

Радиальная деформация, компоненты главных напряжений σ_1 , σ_2 и угол их поворота θ относительно выбранной системы координат связаны соотношением:

$$\varepsilon_r = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2E}(1 + \mu)\frac{R^2}{r^2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2E}\left[(1 + \mu)\frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2}\right]\cos 2\theta, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона, R – радиус отверстия, r – радиус расположения точки определения деформации (расстояние от центра отверстия до точки определения деформации).

После измерения величины радиальной деформации в 3-х различных направлениях вычисляются главные напряжения и определяется их направление.

В качестве примера расчета предположим, что направления главных напряжений и соответственно угол θ неизвестны (рис. 2). Необходимо определить значения главных напряжений и угол поворота относительно выбранной системы координат по трем значениям радиальной деформации, измеренным на равном расстоянии от центра отверстия (предположим на кромке, тогда $R = r$), в точках, расположенных на лучах от центра отверстия под углом 45° друг к другу.

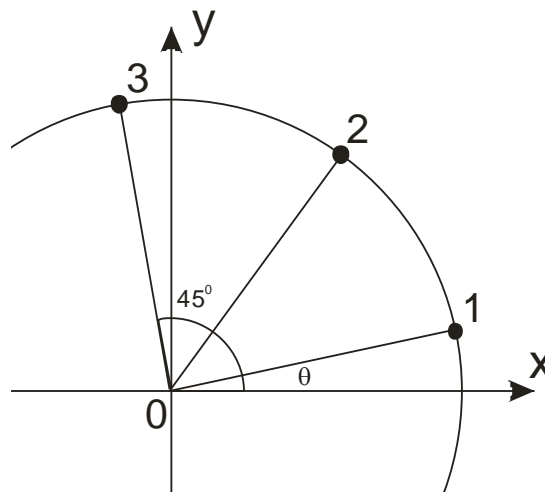


Рисунок 2 – К определению главных остаточных напряжений по значениям радиальной деформации в 3-х точках

Зададимся значениями радиальной деформации: $\varepsilon_{r1} = -1 \times 10^{-4}$; $\varepsilon_{r2} = -0,351 \times 10^{-4}$; $\varepsilon_{r3} = +0,3 \times 10^{-4}$. Решая систему из 3-х уравнений (1) с тремя неизвестными, получим: $\sigma_1 = 13,56 \times 10^7$ Па; $\sigma_2 = -12,48 \times 10^7$ Па; $\theta = -0,0429^0 \approx 0^0$.

Приведенный пример справедлив для случая сверления сквозных отверстий в тонких пластинах, дальнейшая же задача состоит в экстраполяции этих закономерностей на несквозные отверстия различной глубины в сплошном изделии, что позволит получить распределение компонент по глубине.

Согласно плана эксперимента, на обработанной поверхности каждого образца осуществляется сверление 5-ти зондирующих отверстий, глубина которых представлена в табл. 1. Расположение отверстий планируется на достаточном удалении друг от друга, что позволит исключить взаимное влияние возмущенного напряженно-деформированного состояния. Также примем допущение о том, что ОН имеют одинаковое распределение по глубине образца в зоне сверления каждого из отверстий.

Анализ литературных источников показывает, что полученные при сверлении несквозного отверстия смещения и/или деформации позволяют рассчитать среднее значение ОН по глубине зондирующего отверстия.

Поскольку для каждого из 5-ти зондирующих отверстий в результате эксперимента рассчитываются средние по глубине этого отверстия значения главных напряжений σ_1 , σ_2 и угла поворота θ относительно выбранной системы координат (связанной с формой образца), то для определения распределения компонент по глубине используется следующий ниже алгоритм.

По исходным значениям для каждого отверстия определяются нормальные σ_x , σ_y и касательная σ_{xy} компоненты ОН. Предположим, величина главного напряжения σ_1 составляет с осью x угол θ , который менее 90^0 , тогда:

$$\sigma_x = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta; \sigma_y = \sigma_2 \cos^2 \theta + \sigma_1 \sin^2 \theta; \sigma_{xy} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\theta. \quad (2)$$

Обозначим их как σ_{x1} , σ_{y1} и σ_{xy1} для 1-ого отверстия и т.д. (табл. 1) и далее разберем алгоритм на примере компонента σ_x .

Таблица 1

№ отв.	Зондирующее отверстие		Компонент		
	Обозначение	Глубина, мм	σ_x	σ_y	σ_{xy}
1	h_1	0,2	σ_{x1}	σ_{y1}	σ_{xy1}
2	h_2	0,4	σ_{x2}	σ_{y2}	σ_{xy2}
3	h_3	0,7	σ_{x3}	σ_{y3}	σ_{xy3}
4	h_4	1,0	σ_{x4}	σ_{y4}	σ_{xy4}
5	h_5	1,7	σ_{x5}	σ_{y5}	σ_{xy5}

Для каждого отверстия имеется осредненное по глубине h значение компонента σ_x . Произведение величины полученного компонента на его глубину ($\sigma_{x1} h_1$) эквивалентно площади соответствующего прямоугольника на рис. 3.

Очевидно, что, например, произведение $\sigma_{x2} h_2$ содержит в себе произведение $\sigma_{x1} h_1$, а произведение $\sigma_{x3} h_3$ - содержит произведение $\sigma_{x2} h_2$ и т.д.

Определим средне-интервальное значение компонента σ_x^* в интервалах глубин, введя соответствующие обозначения (табл. 2).

Таблица 2

№ интервала	Интервал глубины		Средне-интервальное значение компонента
	от	до	
1	0	h_1	σ_{x1}^*
2	h_1	h_2	σ_{x2}^*
3	h_2	h_3	σ_{x3}^*
4	h_3	h_4	σ_{x4}^*
5	h_4	h_5	σ_{x5}^*

Очевидно, что $\sigma_{x1}^* = \sigma_{x1}$, далее определим σ_{x2}^* :

$$\sigma_{x2} h_2 = \sigma_{x1} h_1 + \sigma_{x2}^* (h_2 - h_1), \text{ откуда}$$

$$\sigma_{x2}^* = \frac{\sigma_{x2} h_2 - \sigma_{x1} h_1}{(h_2 - h_1)}.$$

Аналогично этому:

$$\sigma_{x3}^* = \frac{\sigma_{x3} h_3 - \sigma_{x2} h_2}{(h_3 - h_2)}; \sigma_{x4}^* = \frac{\sigma_{x4} h_4 - \sigma_{x3} h_3}{(h_4 - h_3)}; \sigma_{x5}^* = \frac{\sigma_{x5} h_5 - \sigma_{x4} h_4}{(h_5 - h_4)}. \quad (3)$$

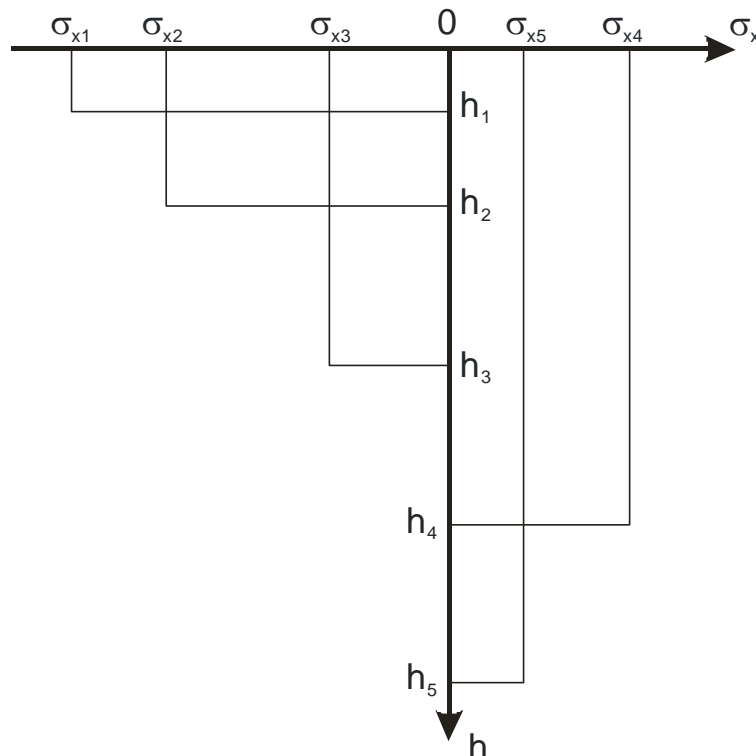


Рисунок 3 – К определению компонент остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя

В результате преобразований определяется распределение компонента по глубине поверхностного слоя, усредненное в пределах указанных диапазонов глубин (рис. 4).

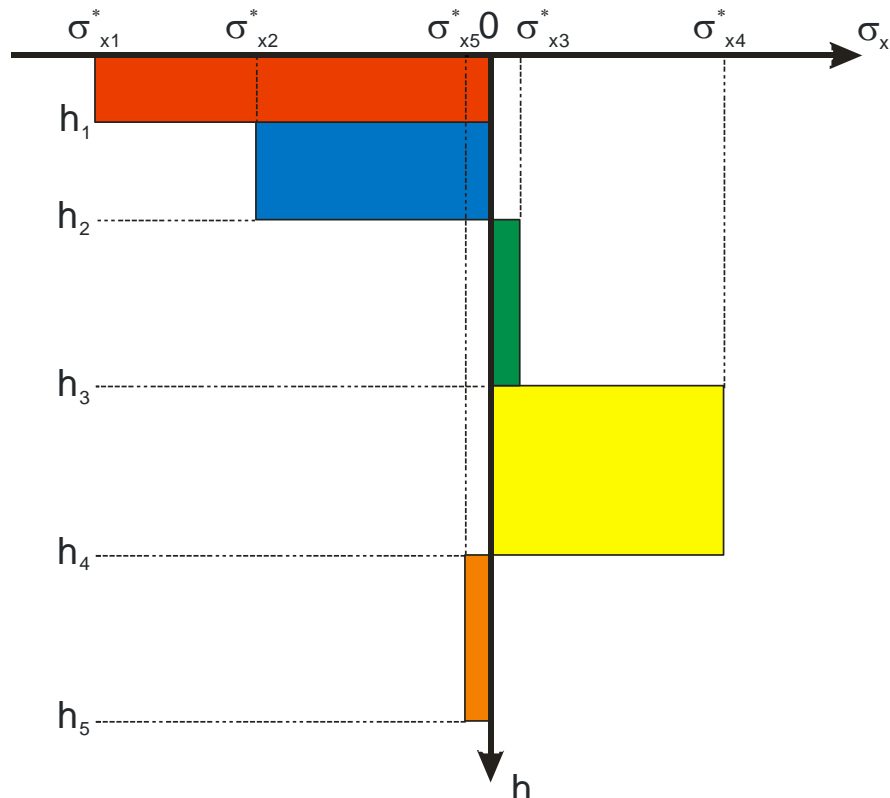


Рисунок 4 – Пример усредненного распределения компонента σ_x по глубине поверхностного слоя

«Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00587».

Список литературы

1. Проблемы и перспективы определения остаточных напряжений металла изделий / Махалов М.С.// Инновации в машиностроении: материалы XI Международной научно-практической конференции (22-23 октября 2020 года, г. Бийск) / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2020. – 379 с. - С. 19-22. - ISBN 978-5-9257-0328-1
2. Zuev L.B., Barannikova S.A., Lunev A.G., Kolosov S.V., Zharmukhambetova A.M. Basic Relationships of the Autowave Model of a Plastic Flow // Russian Physics Journal. 2019. V. 61. P. 1709-1717.
3. Barannikova S., Li Y., Zuev L. Research of the plastic deformation localization of bimetal // Metalurgija. 2018. V. 57. P. 275-278.
4. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. – 232 с.: ил.
5. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г.Н. Чернышев, А.Л. Попов, В.М. Козинцев, И.И. Пономарев. – М.: Наука; Физматлит, 1996. – 240 с.
6. Residual Stress Measurement by ESPI Hole-Drilling / Theo Rickert // 3rd CIRP Confer-

ence on Surface Integrity (CIRP CSI): Procedia CIRP, 2016. V. 45. pp. 203 – 206. - doi: 10.1016/j.procir.2016.02.256

7. Методика исследований остаточных напряжений методом сверления зондирующего отверстия и 2-х экспозиционной спекл фотографии // Махалов М.С., Блюменштейн В.Ю., Учайкин С.Е. // Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий: сборник трудов научного семинара технологов-машиностроителей. - Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2021. – 531 с. - С. 66-72. - ISBN 978-5-7890-1911-5.

THE PROBE HOLE DRILLING AND 2-EXPOSURE SPECKLE PHOTOGRAPHY RESIDUAL STRESS RESEARCH METHODS

Makhalov M.S., Cand. Sc. (Engineering), associate professor, e-mail: maxim_ste@mail.ru

T. F. Gorbachev Kuzbass State technical University, 650026 Vesennaya str., 28, Kemerovo, Russian Federation

Abstract

The probing hole drilling and 2-exposure speckle photography residual stresses (RS) experimental determination research method is presented. The presented method allows to estimate the sample surface plane tangential and normal components distribution over the surface layer depth.

KeyWords: residual stresses, metal mechanical condition, surface layer, surface plastic deformation (SPD), cutting mechanical treatment, two-exposure speckle photography, ESPI Hole-drilling.

УДК 621.7-4 : 539.26 : 66.022.51

РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ ИЗ АРМКО-ЖЕЛЕЗА ПОСЛЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

*БЛЮМЕНШТЕЙН В.Ю., доктор техн. наук, профессор,
blumenstein.vu@gmail.com
МИТРОФАНОВА К.С., аспирант,
kirmeetz@mail.ru*

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650026, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Аннотация

В исследовании представлены результаты рентгеноструктурного анализа (РСА) армко-железа после упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) мультирадиусным роликом (МР-ролик). Экспериментально показано, что обработка ППД МР-роликом с максимальным усилием приводит к существенному увеличению микродисторсии кристаллической решетки, что характерно для наноразмерной структуры.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование (ППД), поверхностный слой (ПС), мультирадиусный ролик (МР-ролик), армко-железо, рентгеноструктурный анализ (РСА).

Введение

Известно, что в настоящее время метод поверхностного пластического деформирования (ППД) является одним из эффективных и высокопроизводительных способов получения высокого качества поверхностного слоя (ПС) обрабатываемой детали. Известно также, что, интенсифицируя напряженно-деформированное состояние металла ПС детали методами ППД, можно получить измельчение зеренной структуры до субмикро- и наноразмеров. Впоследствии данное обстоятельство позволяет достичь значительных эксплуатационных характеристик обрабатываемых деталей.

При решении данного вопроса на кафедре «Технологии машиностроения» КузГТУ был разработан ряд сложнопрофильных деформирующих инструментов для ППД, одним из которых является мультирадиусный ролик (МР-ролик) (рис. 1.1, а) [1]. МР-ролик представляет собой комбинацию 4-х инденторов: $R_{пр1}=1\text{мм}$; $R_{пр2}=1\text{мм}$; $R_{пр3}=1\text{мм}$; $R_{пр4}=3\text{мм}$, расположенных относительно друг друга с некоторым смещением в радиальном направлении (с разными натягами) (рис. 1.1, а). В процессе обработки такое расположение инденторов приводит к сложной кинематике внедрения МР-ролика в ПС заготовки. В результате применение МР-ролика позволяет реализовывать эффективную схему нагружения ПС, которая предполагает создание высокого гидростатического давления в очаге деформации с интенсивным измельчением структуры обрабатываемого материала.

Ранее, были проведены исследования, посвященные обработке ППД МР-роликом [2-7], однако невыясненным остается ряд вопросов.

Целью настоящей работы являлось проведение рентгеноструктурного анализа (РСА) армко-железа, подвергнутого упрочняющей обработке ППД МР-роликом.

Методика исследования

Методика проведения эксперимента заключалась в обкатывании цилиндрических образцов (\varnothing 26 мм) (рис. 1.1) из армо-железа, химический состав и физико-механические свойства которого представлены в таблицах 1.1-1.2, по режимам, представленным в таблице 1.3 и дальнейшей пробоподготовке шлифов для рентгеноструктурного анализа (РСА).

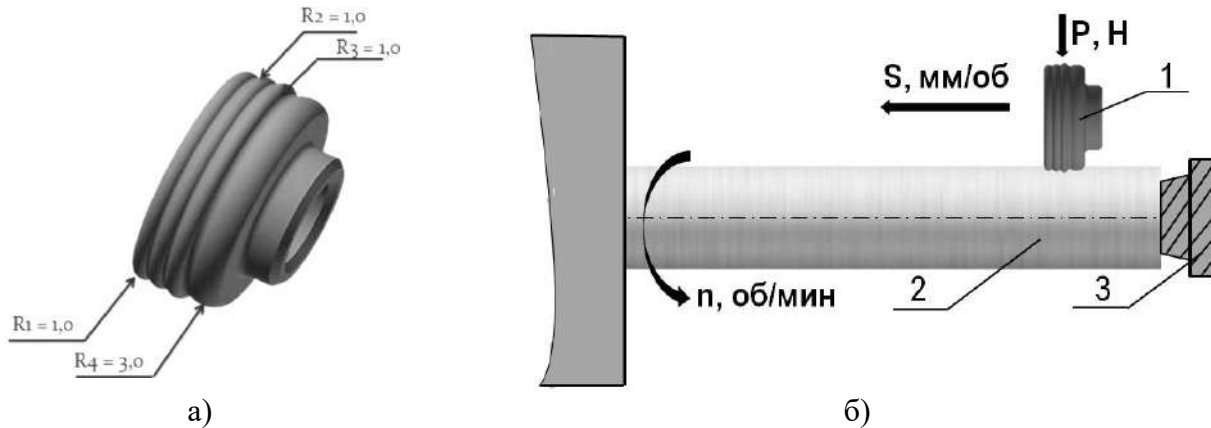


Рисунок 1.1. а) Мультирадиусный ролик (МР-ролик); б) Схема ППД МР-роликом: 1 – МР-ролик; 2 – заготовка; 3 – поджимающий центр

Таблица 1.1 – Химический состав Армо-железа

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %
0,016	0,193	0,225	0,0048	0,0012	0,146	0,260	0,011

Таблица 1.2 – Механические и физические свойства Армо-железа

$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	Ψ , %	δ , %	КСУ, Дж/см ²	HV
250	120	50	85	30	80

Таблица 1.3 – Состояние образцов и режимы ППД

№ образца, состояние	Усилие обкатывания, P, Н	Подача, S, мм/об	Частота, n, об/мин
Образец №1, обработка МР-роликом по режиму 1	2700	0,07	630
Образец №2, обработка МР-роликом по режиму 2	800		

Рентгеноструктурный фазовый анализ (РСА) проводился как в упроченной, так и в необработанной части образцов, на дифрактометре ДРОН-3. Для получения рентгенограмм применяли монохроматизированное $K\alpha$ -излучение меди при ускоряющем напряжении 30 кВ и силе тока 5 мА. Запись интенсивности рассеянного рентгеновского излучения осуществлялась в режиме сканирования (по точкам) в угловом диапазоне 35° - 100° с шагом $0,05^\circ$ и фиксированным временем счета 3с. Для фазового анализа использовалась стандартная база COD.

Для определения величины физического уширения β дифракционных линий матричной фазы использовался метод аппроксимации [8-10]. В качестве аппроксимирующей функции выбиралась функция $1/(1+\epsilon x^2)^2$.

Расчет областей когерентного рассеивания [8-10] осуществлялся по формуле Шеррера:

$$D = \lambda/\beta \times \cos\theta, \quad (1.1)$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения (1.54178 Å); θ – положение дифракционного рефлекса (101); β – ширина на половине высоты дифракционного рефлекса.

Расчет микродисторсии решетки осуществлялся по формуле:

$$\epsilon = \beta \times \text{ctg } \theta, \quad (1.2)$$

где θ – положение дифракционного рефлекса; β – ширина на половине высоты дифракционного рефлекса (202).

На рис. 1.2 представлена схема исследования образцом методом РСА.



Рисунок 1.2 – Схема исследования образцов методом РСА: 1 – точка сканирования (левый, верхний край шлифа, упрочненный слой), 2-3 – точки сканирования (середина шлифа, упрочненный слой), 4 – точка сканирования (правый, верхний край шлифа, упрочненный слой), 5 – точка сканирования (центр шлифа, неупрочненный слой)

Результаты и обсуждение

В результате рентгеноструктурного анализа (РСА) установлено, что ППД МР-роликом образца № 1, обработанного с усилием 2700 Н, приводит к уменьшению параметра кристаллической решетки α -Fe в середине шлифа упрочненного слоя (точка исследования №2) (рис. 1.2) до $a = 0,28664$ нм (табл. 1.4). Рентгеновские дифракционные линии от матричной α -фазы существенно размываются (рис. 1.3) и уширение формы профилей дифракционных линий вероятно связано с уменьшением областей когерентного рассеивания (ОКР) в результате измельчения структуры в процессе ППД МР-роликом (табл. 1.4).

Размер ОКР уменьшился в 1,4 раза по сравнению с областью центра шлифа неупрочненного слоя. Расчет параметра решетки для образца №1 осуществлялся по 3 пикам (110), (200) и (211), а микродисторсия определялась по пику (211) (рис. 1.3).

Таблица 1.4 – Результаты РСА образцов после ППД МР-роликом

№ образца	Изменение межплоскостного расстояния, а, Å		Размеры области когерентного рассеивания (средний размер кристаллитов,) D, нм		Микродисторсия (микрорискажения) кристаллической решетки, $\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$, 10^{-3}	
	исходное состояние	после ППД МР-роликом	исходное состояние	после ППД МР-роликом	исходное состояние	после ППД МР-роликом
Образец №1	2.8679	2.8664	56	41	0.9	2.0
Образец №2	2.8661	2.8675	60	51	0.9	1.3

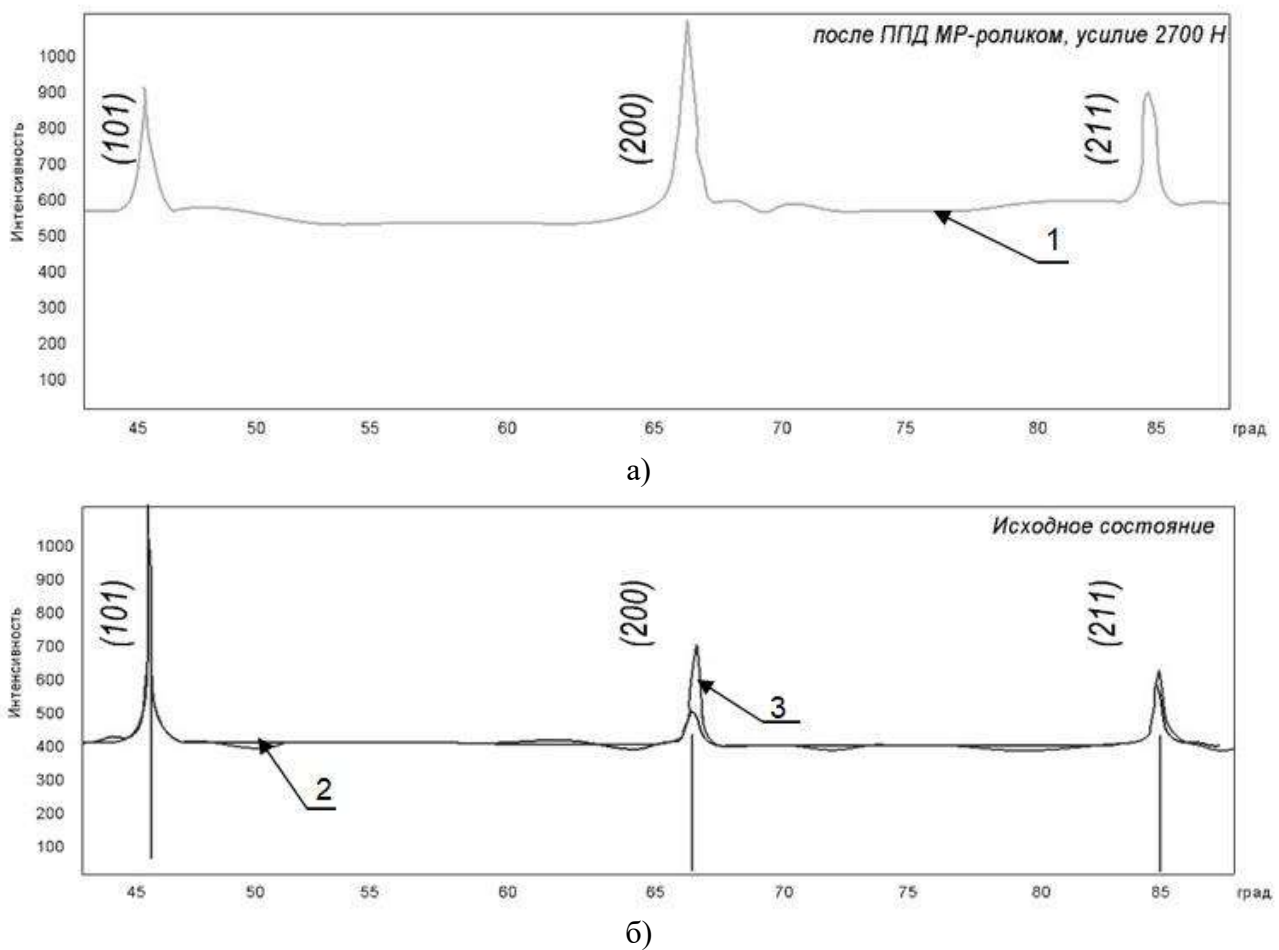


Рисунок 1.3 – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CuK_{α}) образца №1 после ППД МР-роликом, с усилием 2700 Н: а) после ППД МР-роликом; б) неупрочненный слой. Сравнение рентгенограмм, снятых с обработанной поверхности (линия 1) и неупрочненного слоя (линия 2), проводилось с эталоном (линия 3)

На рис. 1.4 приведены фрагменты рентгеновских дифрактограмм ПС образца №2, после ППД МР-роликом с усилием 800 Н. Значение параметра ОЦК кристаллической решетки

α -Fe в неупрочненной части образца (точка № 5, рис.1.2) составляет $a = 0,28661$ нм. Дифракционные линии матричной фазы α - Fe узкие, как и в случае образца №1.

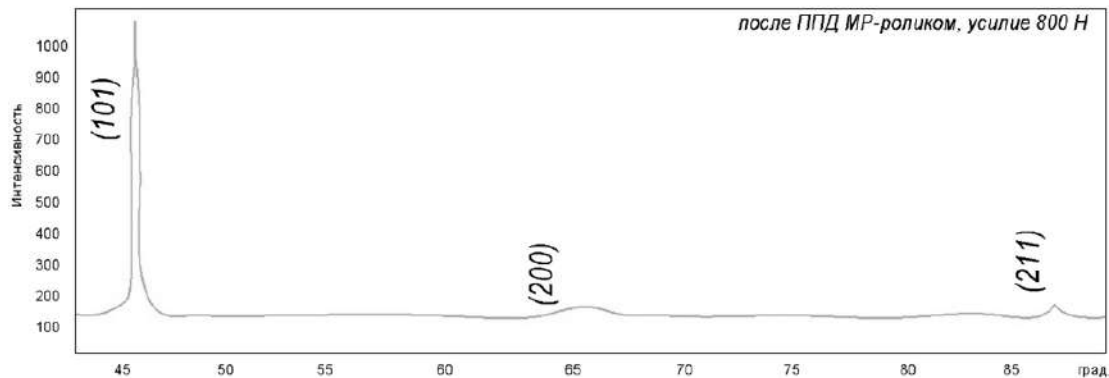


Рисунок 1.4 – Фрагмент рентгеновской дифрактограммы ($\text{CuK}\alpha$) образца №2, после ППД МР-роликом, с усилием 800 Н

Поверхностное пластическое деформирование образца №2 приводит к увеличению параметра кристаллической решетки α -Fe в упрочненном слое (точка № 2, рис. 1.2) до $a = 0,28675$ нм (табл. 1.4). Рентгеновские дифракционные линии от матричной α -фазы существенно размываются (рис. 1.4), отчетливо выделяется пик (110) и отмечается уменьшение областей когерентного рассеяния в 1,2 раза по сравнению в область центра шлифа (таблица 1.4).

На рис. 1.5 представлена зависимость среднего размера ОКР (D) от усилия обкатывания (P). Установлено, что с увеличением усилия обкатывания при ППД МР-роликом средний размер кристаллитов достигает 40 нм, что коррелирует с полученными результатами атомно-силовой микроскопии. На рис. 1.6 представлена линейная зависимость уровня микроискажений кристаллической решетки ($\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$) от среднего размера кристаллитов (D).

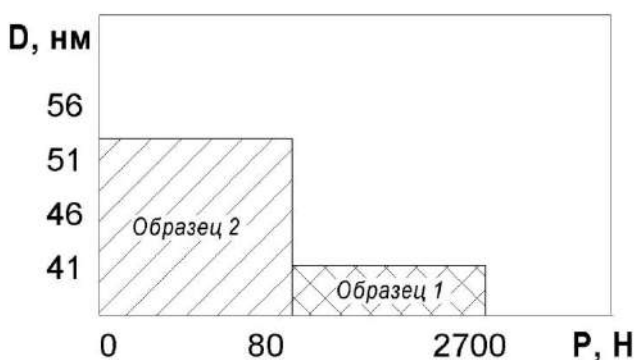


Рисунок 1.5 – Зависимость среднего размера ОКР (D) от усилия обкатывания (P)

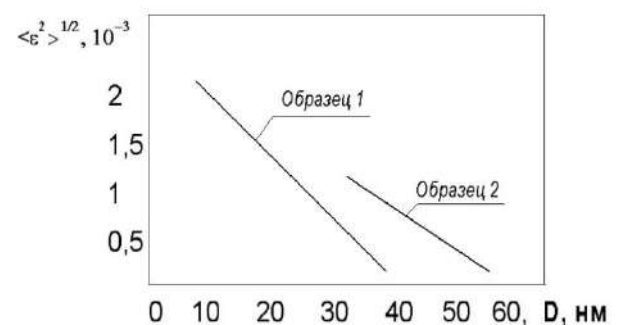


Рисунок 1.6 – Зависимость микродисторсии решетки ($\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$) от среднего размера ОКР (D)

Видно, что обработка образца с наибольшим усилием (образец №1), приводит к значительному микроискажению решетки (при исходном значении $0,9 \cdot 10^{-3}$). Наличие микроискажений обусловлено в основном наличием линейных и точечных дефектов кристаллической

решетки. Кроме того, известно, что в материалах с наноразмерной структурой, ввиду наличия развитой сети межкристаллитных границ, увеличение микродисторсии может быть связано с наличием дефектной структурой границ зерен [8]. В свою очередь, полученные результаты согласуются с ранее полученными данными атомно-силовой микроскопии (АСМ) [7], которые показывают, что обработка МР-роликом с наибольшим усилием, приводит к интенсивной деформации ПС и сопровождается «вытягиванием» зерен в направлении подачи МР-ролика и искривлением границ зерен.

Выводы

Таким образом, по результатам рентгеноструктурного анализа, можно сказать, что обработка ППД МР-роликом с максимальным усилием приводит к существенному увеличению микродисторсии кристаллической решетки, что характерно для наноразмерной структуры. Важно отметить, что ранее полученные результаты металлографического анализа хорошо согласуются с результатами рентгеноструктурного анализа и дают лучшее понимание процессов, происходящих в поверхностном слое обрабатываемого материала при ППД МР-роликом.

«Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00587».

Список литературы

1. Патент РФ № 2557377. Ролик обкатной мультирадиусный: пат. 2557377 Рос. Федерация. № 2013135797/02; заявл. 20.07.20153; опублик. 27.05.2016, Бюл. № 27 (II ч.). 6 с.
2. Mitrofanova K.S. Study of Surface Layer Hardening after Treatment Complex Tool / K.S. Mitrofanova // Solid State Phenomen. - 2020. - Vol. 303. - P.89-96. - <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.303.89>.
3. Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Анализ влияния запаса пластичности на накопление деформаций при ППД сложнопрофильным инструментом / Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. // Упрочняющие технологии и функциональные покрытия в машиностроении. Сборник трудов IV Всероссийской молодежной научно-практической школы с международным участием. Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. – 2018. – С. 1-4.
4. Blumenstein V.Y., Mitrofanova K.S. Study of the parameters of the pure iron structure after surface plastic deformation treatment with a complex-profile tool / V.Y. Blumenstein, K.S. Mitrofanova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2021. Vol. 1029 (1). - P. 012013. - doi:10.1088/1757-899X/1029/1/012013.
5. Блюменштейн В.Ю., Кукареко В.А., Григорчик А.Н., Митрофанова К.С. Исследование качества поверхностного слоя при обработке мультирадиусным деформирующим инструментом / Блюменштейн В.Ю., Кукареко В.А., Григорчик А.Н., Митрофанова К.С. // В сборнике: Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации) Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. - 218. - С.21-29.
6. Krechetov A., Mitrofanova K. The Study of Multiradius Roller Running Process / A. Krechetov, K. Mitrofanova // MATEC Web of Conferences. - 2019. - Vol. 297. - P. 05003. - DOI: 10.1051/mateconf/201929705003.
7. Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. Особенности формирования микроструктуры поверхностного слоя армко-железа после поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом / Блюменштейн В.Ю., Митрофанова К.С. // В сборнике: Пер-

спективные направления развития финишных и виброволновых технологий. Сборник трудов научного семинара технологов-машиностроителей. - ДГТУ. - 2021. - С. 72-77.

8. Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С.Уманский, Ю.А.Скаков, А.Н. Иванов // – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.

9. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: учеб. пособие для вузов / С.С.Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев // МИСиС.–3-е изд., доп. и перераб. –М. 1994.–328с.

10. Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов /Л.И.Миркин // –М. 1961.–684 с.

X-RAY STRUCTURAL ANALYSIS OF PURE-IRON SAMPLES AFTER HARDENING TREATMENT WITH A COMPLEX-PROFILE TOOL

Blumenstein V. Yu. blumenstein.vu@gmail.com

Mitrofanova K.S. kirmeetzz@mail.ru

Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Vesennuy 28 street. 650000

Abstract

Results of research of X-ray diffraction analysis (XA) of pure-iron after hardening treatment of the surface plastic deformation (SPD) with a multiradius roller (MR-roller). It is experimentally shown that the processing of SPD with an MR-roller, with maximum effort, leads to a significant increase in the microdisorsion of the crystal lattice, which is characteristic of a nanoscale structure.

Keywords: surface plastic deformation (SPD), multiradius roller (MR-roller), pure-iron, X-ray diffraction analysis (X-ray diffraction).

УДК 621.787.4

УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ОСИ МОСТА ВИЛОЧНОГО ПОГРУЗЧИКА ЗА СЧЕТ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

*ГАЛАЙ Марина Сергеевна, канд. техн. наук, доцент,
e-mail: galayms@mail.ru*

*ИЛЬИНЫХ Андрей Степанович, д-р техн. наук, доцент,
e-mail: asi@stu.ru*

Сибирский государственный университет путей сообщений
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191

Аннотация

В работе представлены результаты исследования упрочнения поверхности оси крепления управляемого моста вилочного погрузчика поверхностным пластическим деформированием. Определено усилие, необходимое для упрочнения оси при обкатке роликом диаметром 5 мм. Исследованы микротвердость и структура поверхности оси после обработки поверхностным пластическим деформированием.

Ключевые слова: поверхностное пластическое упрочнение, твердость, структура, износ, отказы, вилочный погрузчик.

Введение

В настоящее время на предприятиях для выполнения погрузочно-разгрузочных работ используют вилочные погрузчики. Следует отметить, что зачастую такая техника эксплуатируется без должного технического обслуживания по регламенту и от этого в первую очередь страдают высоконагруженные части машины. Статистический анализ дефектов погрузчиков Komatsu FD и Komatsu FG за период 2016-2020 гг (рис. 1) показал, что наибольшее число отказов узлов и агрегатов вилочных погрузчиков приходится на топливную систему, гидравлическую систему и электрооборудование [1]. Доля отказов по ходовой части мала, но при этом следует отметить, что ходовая часть является важнейшим узлом в мобильном передвижном механизме. Устройство задней ходовой части сложнее, чем передней, поскольку в ней содержится больше элементов.

Анализ эксплуатации показал, что наибольшее число отказов приходится на колесные шпильки (табл.1). Это связано с тем, что колеса на погрузчиках часто прокалывают, и водители погрузчиков самостоятельно меняют колесные камеры, а после установки колеса на погрузчик затягивают колесные гайки, не соблюдая заводские моменты затяжки, тем самым срывая шпильки.

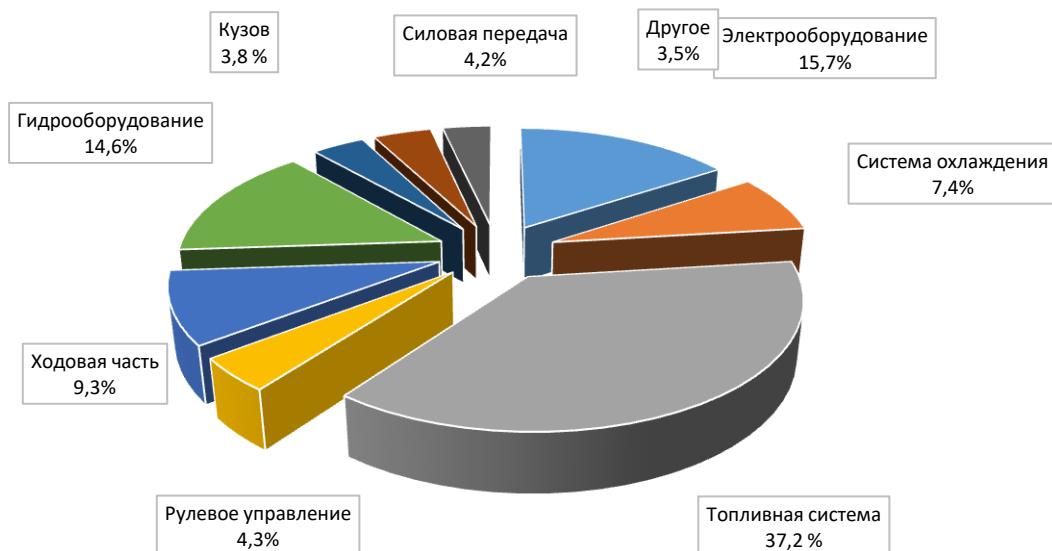


Рисунок 1 – Процентное соотношение отказов по узлам и агрегатам вилочных погрузчиков Komatsu FD и Komatsu FG

Таблица 1 – Отказы механизмов задней ходовой части

Узел	Отказ, %
Ось опоры управляемого моста	17,4
Ступичный подшипник внутренний	3,7
Ступичный подшипник наружный	4,0
Ступица	1,0
Шпилька колеса	20,2
Шкворень	6,5
Подшипник шкворня	2,4
Опорный подшипник	3,7
Рулевой наконечник	19,4
Поворотный кулак	2,7
Палец рулевого наконечника	19,0
Всего	100

На втором и третьем месте располагаются рулевые наконечники и рулевые пальцы. Данный тип износа связан с неровными полами, естественным износом, а также с порванными пыльниками рулевых наконечников. На четвертом месте расположена ось опоры крепе-

ния управляющего моста. Это связано с тем, что износ в этом соединении происходит в результате колебательных движений заднего моста относительно рамы погрузчика, поскольку угол отклонения балки от горизонтальной линии в обе стороны равен 5 градусам (рис.2).

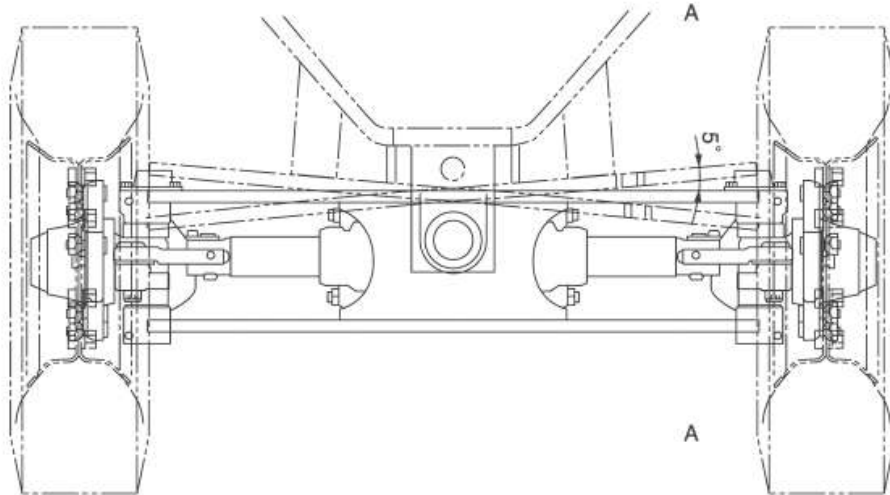


Рисунок 2 – Задняя ходовая часть вилочного погрузчика

Несмотря на то, что между рамой погрузчика и осью крепления устанавливается пластиковая втулка и весь узел шприцуются консистентной смазкой каждое техническое обслуживание, на данной оси наблюдается абразивный износ в результате попадания песка и грязи (рис.3).



Рисунок 3 – Изношенная ось крепления управляемого моста

Практика показывает, что многие предприятия пренебрегают проведением технического обслуживания каждые 200 моточасов и это негативно сказывается на надежности данного узла. Кроме того, технологический процесс ремонта не подразумевает замены этой части моста в случае критического износа, а предполагает замену управляемого моста в сборе. Однако на практике ремонт осуществляют путем отрезания изношенной части оси и приваривания новой. В данной работе предлагается рассмотреть возможность упрочнения оси управляемого моста путем поверхностного пластического деформирования.

Экспериментальные исследования и результаты

Для исследований были приготовлены образцы из стали 45. Данный материал является аналогом стали S45C (SWRCH45K), из которой изготовлена балка управляемого моста. В качестве способа упрочнения поверхностным пластическим деформированием выбран способ обкатывания роликом [2-4]. Для определения усилия обкатывания была использована методика, предложенная Горбило В. М. [5]. При прижимании ролика к обрабатываемой поверхности создается усилие - реактивная сила R , которая раскладывается на три составляющие: нормальную, касательную и осевую силы, основной принято считать нормальную.

Нормальную силу можно также определить по формуле В.М.Горбило [5].

$$P_H = \pi \cdot \varepsilon \cdot HV \cdot R^2 \quad (1)$$

где ε – относительная глубина внедрения алмаза $\varepsilon = 0,0015 - 0,007$;

HV – твердость по Виккерсу.

R – радиус деформирующего инструмента.

Твёрдость образцов определяли на приборе ТП-7Р-1 по методу Виккерса [6]. Для измерения твердости была выбрана нагрузка 100 кгс, при этом индентор под нагрузкой выдерживали 15 с. Твердость образцов составила HV 289.

По формуле (1) определили силу, которую необходимо приложить при обкатывании, приняв радиус деформирующего элемента 5 мм:

$$P_H = 3,14 \cdot 0,007 \cdot 289 \cdot 5^2 = 159 \text{ кгс} = 1590 \text{ Н.}$$

Таким образом, для упрочнения стали 45 поверхностным пластическим деформированием необходимо приложить нагрузку 1590 Н.

При обкатывании в поверхностном слое металла происходит пластическая деформация, при этом в поверхностном слое наблюдается явление наклепа. Для того чтобы проверить обеспечивает ли нагрузка 1590 Н создание в поверхностном слое наклепа, проведен эксперимент путем испытания образца на сжатие.

После проведения испытаний на сжатие оценивали изменение микроструктуры и твердости. Оценку микроструктуры проводили на металлографическом микроскопе МИМ – 8. По результатам микроструктурного анализа установлено, что на образцах без деформации присутствует зернистая структура без следов деформации. Структура стали соответствует структуре стали марки 45. Структура представлена неравномерными зёрнами перлита, вокруг которых образовалась грубая сетка феррита (рис. 4).

После приложения нагрузки 1590 Н в поверхностном слое наблюдается зернистая структура с признаками следов деформации. Это свидетельствует об упрочнении поверхностного слоя материала. Для определения глубины упрочнения были проведены исследования микротвердости на приборе ПМТ – 3. Измерения проводили от поверхности образца вглубь. По результатам установлено, что глубина упрочнения составляет 0,7 мм (Рис.5).

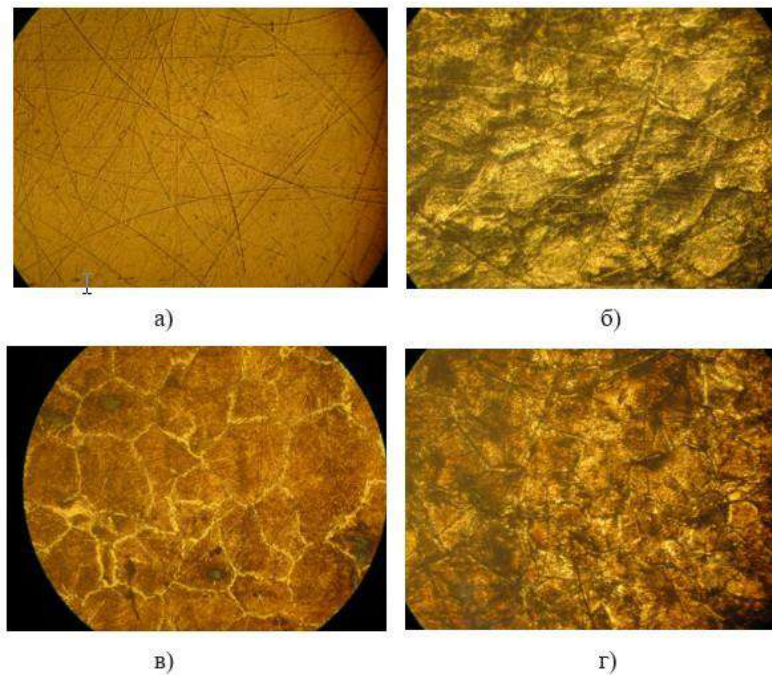


Рисунок 4 – Микроструктура образцов, x100: а) нетравленная структура недеформированного образца; б) нетравленная структура деформированного образца; в) травленная структура недеформированного образца; г) травленная структура деформированного образца

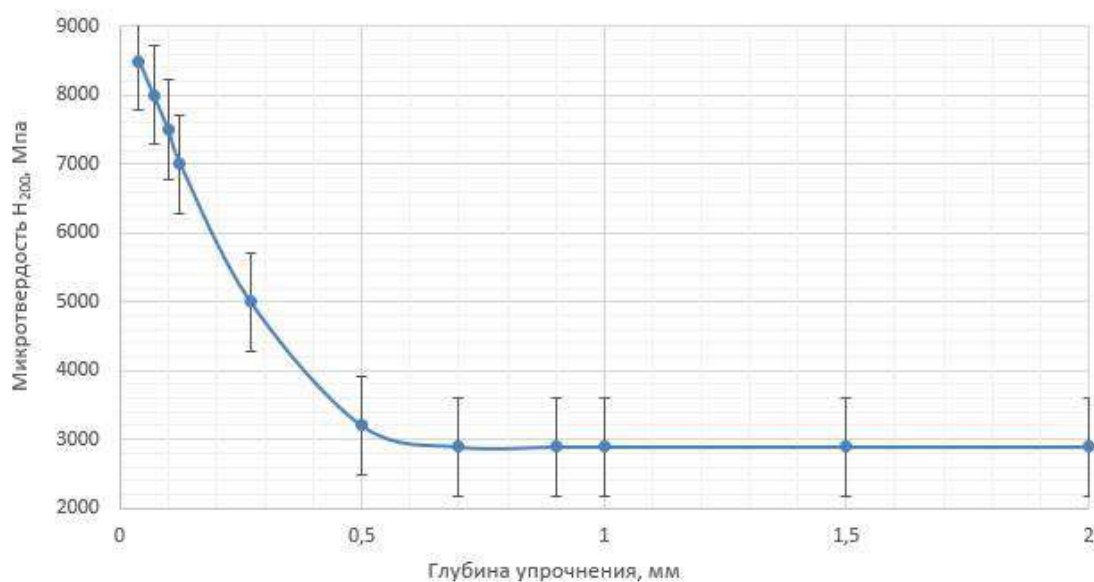


Рисунок 5 – График зависимости микротвердости от глубины упрочнения

Выводы

Комплекс проведенных исследований показал, что в технологический процесс ремонта моста вилочного погрузчика следует ввести операцию упрочнения оси крепления за счет поверхностного пластического деформирования. При поверхностном пластическом дефор-

мировании, в частности обкатывании роликом, создается упрочненный слой глубиной порядка 0,7 мм, что позволит уменьшить износ данного элемента при эксплуатации.

Список литературы

1. Компания Форклифт Официальный дилер по технике KOMATSU, Atlet by UNICARRIERS, IPC GANSOW, AJ POWER. URL: <https://komatsusib.ru/company/journal/> (дата обращения: 24.04.2021)
2. Отений Я.Н. Сравнительный анализ определения глубины упрочнения при поверхностном пластическом деформировании по различным методикам // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. - №3. с. с.3-4
3. Пшебыльский В.П. Технология поверхностной пластической обработки. М.: Металлургия, 1991. 476 с.
4. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
5. Торбило В.М. Алмазное выглаживание. М.: Машиностроение, 1972. 104с
6. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 Металлы и сплавы Измерение твердости по Виккерсу URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200060184> (дата обращения: 14.05.2021)

HARDENING OF THE FORKLIFT AXLE SHAFT BY SURFACE PLASTIC DEFORMATION

Galay M. S. (Engineering), Associate Professor, e – mail: galayms@mail.ru
Ilinykh A.S. (Engineering), Professor, e – mail: asi@stu.ru

SiberianTransportUniversity, 191 DusiKoval'chuk Street, Novosibirsk, 630049, Russia

Abstract

The paper presents the results of a study of the hardening of the surface of the axle shaft of a forklift by surface plastic deformation. The force required to strengthen the axis during running-in with a roller with a diameter of 5 mm is determined. The microhardness and structure of the axle shaft surface after surface plastic deformation treatment are investigated.

Keywords: surface plastic deformation, hardening, hardness, structure, wear, failures, forklift.

УДК 621.791.72

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В 2D И 3D МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЯХ, НАНЕСЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

*ШЕЛЕГ Валерий Константинович¹, доктор техн. наук, член-корр. НАН Беларуси,
e-mail: sheleh@tut.by*

*ЛУЦКО Николай Иванович¹, научный сотрудник,
e-mail: nilucko@tut.by*

*ПИЛЕЦКАЯ Людмила Игнатьевна¹, научный сотрудник,
e-mail: scvdmmed@bntu.by*

*АРТЮКЕВИЧ Артемий Васильевич¹, магистр,
e-mail: artemiK2@mail.ru*

¹Белорусский национальный технический университет, 220013, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 65

Аннотация

В статье исследуется возможность оценки уровня и знака остаточных напряжений в покрытиях, нанесенных методом лазерной наплавки, путем прогиба призматических образцов. Показано, что в мультимодальных покрытиях из разнородных материалов (самофлюсующегося сплава на основе никеля и бронзы) образуются растягивающие остаточные напряжения, уровень которых достаточно высок. Произведено сравнение уровня остаточных напряжений в мультимодальном покрытии с уровнем остаточных напряжений в однородных покрытиях из сплава на основе никеля и бронзы. Установлена закономерность влияния скорости лазерной наплавки на уровень остаточных напряжений в мультимодальных покрытиях из разнородных материалов.

Ключевые слова: Остаточные напряжения, лазерная наплавка, прогиб, мультимодальные покрытия, скорость наплавки.

Введение

Упругие напряжения, остающиеся в поверхностном слое детали после любого вида обработки или нанесения покрытия, считаются остаточными напряжениями. Они являются важнейшим фактором, характеризующим состояние поверхностного слоя. При нанесении покрытий остаточные напряжения в значительной степени определяют эксплуатационные характеристики последних. Остаточные напряжения сжатия оказывают положительное воздействие, приводя к повышению прочности деталей. В то же время, остаточные напряжения растяжения ослабляют прочность поверхностного слоя, приводя к возникновению трещин в покрытиях. Между тем, остаточные напряжения растяжения образуются в покрытиях наиболее часто.

Метод лазерной наплавки дает возможность наносить мультимодальные покрытия из разнородных материалов путем послойного чередования валиков, состоящих из материалов, свойства которых достаточно сильно отличаются [1]. Такие покрытия будут вызывать накопление больших остаточных напряжений. Целью настоящей работы является оценка уровня и знака остаточных напряжений, возникающих в 2D (однослойных) и 3D (двухслойных) мультимодальных покрытиях, нанесенных лазерной наплавкой.

В работах [2, 3, 4] подробно разобран механизм образования остаточных напряжений, методы их выявления и классификации. Остаточные напряжения бывают первого, второго и третьего рода. Поскольку определение напряжений второго и третьего рода достаточно сложно, в этой статье рассматривается уровень остаточных напряжений первого рода. Разработано достаточно много методик определения остаточных напряжений [4]. Но из-за большой неоднородности физико-механических свойств поверхностного слоя, возникающей при лазерной наплавке, большинство известных методик применить невозможно. По этой причине для изучения напряженного состояния на различных этапах нанесения покрытий при разных технологических режимах проводились оценочные эксперименты, позволявшие провести качественный анализ влияния режимов нанесения мультимодальных покрытий на знак и уровень технологических остаточных напряжений. Критерием оценки являлась величина прогиба призматических образцов.

Описание проводимых исследований

Образцы для исследования напряженного состояния представляли собой призму с размерами $70 \times 20 \times 3$ мм из стали 45. На образцы методом лазерной наплавки наносили 3D мультимодальное покрытие из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01. Для сравнения были изготовлены образцы с однородными покрытиями из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01, а также образцы, подвергнутые односторонней лазерной закалке. Для каждого вида обработки было подготовлено по 5 образцов.

Наплавка покрытий выполнялась на лазерном технологическом комплексе на базе CO_2 лазера непрерывного действия «Комета 2» и координатного стола с системой числового программного управления. При наплавке мультимодальных покрытий использовались скорости наплавки сплава/бронзы 80/120, 100/140, 120/160, 140/180, 160/200 мм/мин. Мощность лазерного излучения составляла 1000 Вт. Нанесению покрытий предшествовала операция дробеструйной обработки чугунной колотой дробью размером 2 мм.

Величина прогиба призматических образцов с учетом возможной неравномерности прогиба на их концах определялась исходя из рис. 1.

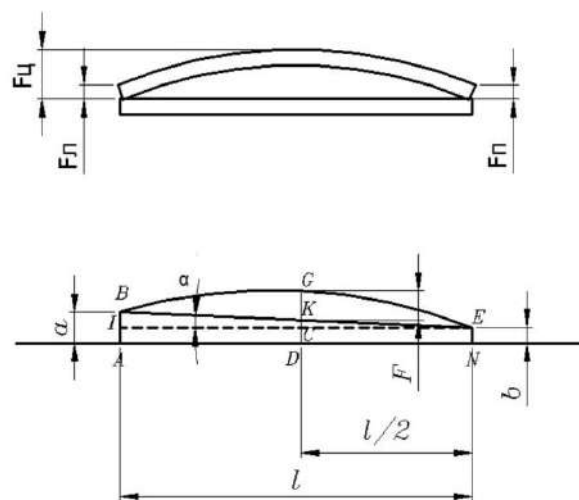


Рисунок 1 – Схема расчета прогиба призматического образца

Расчет прогиба F производился по следующим формулам:

$$\text{- при } F_L > F_P \quad F = F_{\text{ц}} - \left(\frac{F_L - F_P}{2} + F_P \right); \quad (1)$$

$$\text{- при } F_L < F_P \quad F = F_{\text{ц}} - \left(\frac{F_P - F_L}{2} + F_L \right), \quad (2)$$

где F_L и F_P – прогибы на, соответственно, левом и правом концах образца, $F_{\text{ц}}$ – прогиб в центре образца.

Величины прогиба F_L , F_P и $F_{\text{ц}}$ измерялись с помощью индикаторной стойки в специальном приспособлении.

Для обеспечения достоверности определения уровня и знака остаточных напряжений измерение прогиба производилось последовательно после каждого этапа нанесения мультимодального покрытия (после дробеструйной обработки, после нанесения 2D (однослойного) мультимодального покрытия и после нанесения 3D (двухслойного) мультимодального покрытия). Прогиб считался положительным (+), если происходил в сторону, противоположную стороне нанесения покрытия (проведения обработки), возникающие напряжения в этом случае были напряжениями растяжения. Если образец прогибался в сторону, на которую было нанесено покрытие, прогиб считался отрицательным (-), а возникающие остаточные напряжения – напряжениями сжатия.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены результаты определения относительной величины и знака остаточных напряжений на всех этапах нанесения 3D мультимодального покрытия, а также двухслойных однородных покрытий из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01.

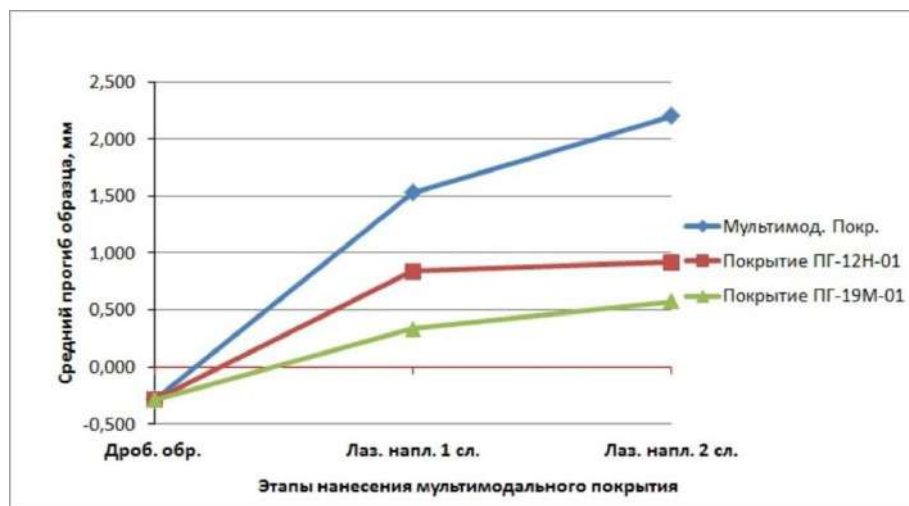


Рисунок 2 – Изменение среднего прогиба образцов на различных этапах нанесения двухслойных покрытий методом лазерной наплавки

Из рис. 2 видно, что после дробеструйной обработки в поверхностном слое образцов формируются остаточные напряжения сжатия. После лазерной наплавки первого слоя всех

покрытий в образцах уже происходит образование остаточных напряжений растяжения. При наплавке вторых слоев покрытий наблюдается дальнейшее увеличение величины остаточных напряжений растяжения.

На рис. 3 для сравнения показана величина прогиба призматических образцов после нанесения различных покрытий и после лазерной закалки. Из рис. 3 видно, что после дробеструйной обработки наблюдается образование остаточных напряжений сжатия (прогиб отрицательный). При лазерной закалке и нанесении всех покрытий образуются остаточные напряжения растяжения (прогиб положительный). Наиболее низкий уровень остаточных напряжений растяжения наблюдается при лазерной закалке. Наибольшая величина прогиба и, соответственно, уровня остаточных напряжений растяжений наблюдается для 3D (двухслойного) мультимодального покрытия. Несколько ниже положительный прогиб для 2D (однослойного) мультимодального покрытия. Величины прогиба для однородных покрытий из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 значительно ниже.

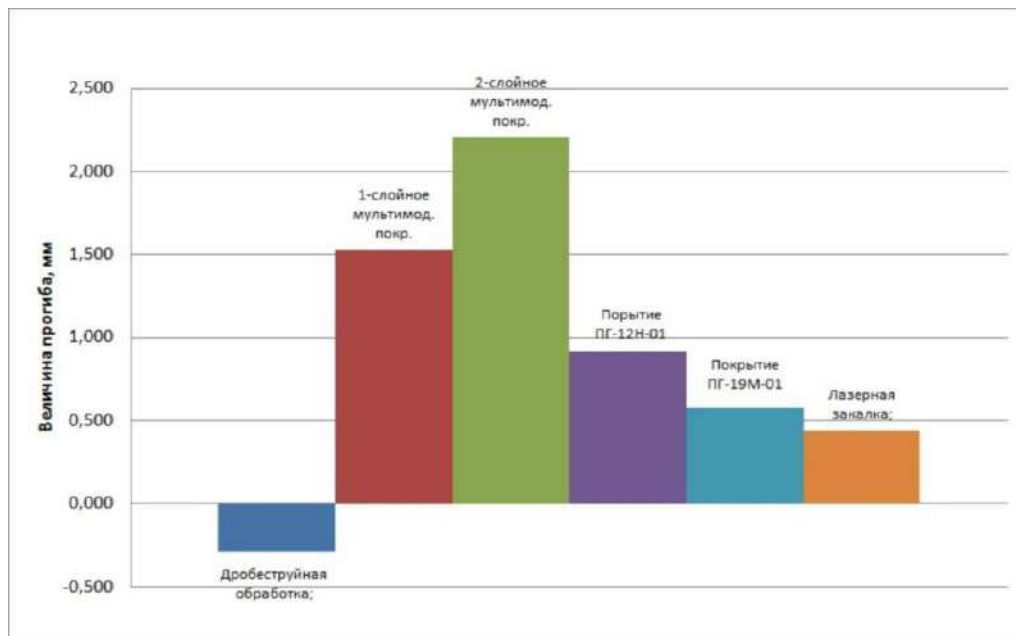


Рисунок 3 – Величина прогиба призматических образцов после нанесения различных покрытий и после лазерной закалки

Из-за высокого уровня остаточных напряжений растяжения для 3D и 2D мультимодальных покрытий особое значение имеет выбор режимов наплавки, обеспечивающих минимальный уровень этих напряжений, а также обязательная дробеструйная обработка перед нанесением таких покрытий, несколько снижающая уровень напряжений растяжения.

На рис. 4. приведены зависимости прогиба призматических образцов от скорости наплавки 2D и 3D мультимодальных покрытий. Видно, что при увеличении скорости наплавки обоих покрытий величина прогиба призматических образцов увеличивается, следовательно, увеличиваются и остаточные напряжения растяжения. Такая зависимость величины прогиба от скорости наплавки мультимодальных покрытий объясняется тем, что при увеличении скорости наплавки мод мультимодального покрытия возрастает скорость охлаждения покрытия,

а, следовательно, растет градиент температуры между покрытием и подложкой и величина остаточных напряжений растяжения.

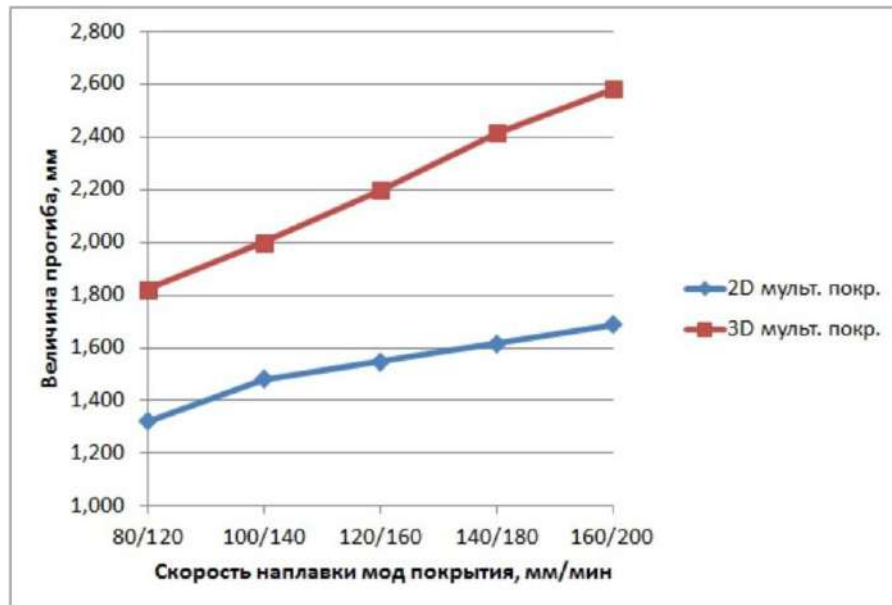


Рисунок 4 – Зависимости прогиба образцов с 2D и 3D мультимодальными покрытиями от скорости наплавки

Выводы

1. Предварительная дробеструйная обработка поверхности перед нанесением мультимодальных покрытий обеспечивает некоторое уменьшение итоговых остаточных напряжений растяжения.
2. При лазерной наплавке мультимодальных покрытий уровень остаточных напряжений растяжения достаточно велик и превышает уровень остаточных напряжений при наплавке однородных покрытий.
3. С увеличением скорости наплавки мод мультимодальных покрытий происходит увеличение уровня остаточных напряжений растяжения. Поэтому для обеспечения приемлемого напряженного состояния в таких покрытиях, лазерную наплавку следует производить в области низких скоростей наплавки.

Список литературы

1. Feldshtein, E. E. On the Features of Composite Coating, Based on Nickel Alloy and Aluminum-Iron Bronze, Processed by Direct Metal Deposition [электронный ресурс]/ E. E. Feldshtein, O. Devojno, M. Kardapolava, N. Lutsko, J. Patalas-Maliszewska// Materials. – 2021. – V. 14. – I. 4. – article No 957. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/ma14040957>, свободный.
2. Биргер, И.А. Остаточные напряжения/И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1963. – 232 с.
3. Мрочек, Ж.А. Остаточные напряжения/ Ж.А. Мрочек, С.С. Макаревич, Л.М. Кожуро и др./ Под ред. С.С. Макаревича. – Минск: Технопринт, 2003. – 352 с.
4. Подзей, А.В. Технологические остаточные напряжения/ А.В. Подзей, А.Н. Сумма, М.И. Евстигнеев/ Под. ред. А.В. Подзея. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.

**RESIDUAL STRESSES IN 2D AND 3D MULTIMODAL COATINGS DEPOSITED
BY LASER CLADDING**

Sheleg V.K., D.Sc. (Engineering), Corresponding Member of NAS of Belarus,

e-mail: sheleh@tut.by

Lutsko N.I., Researcher, e-mail: nilucko@tut.by

Piletskaia L.I., Researcher, e-mail: scvdmed@bntu.by

Artiukevich A.V., Master. (Engineering), e-mail: artemiK2@mail.ru

Belarusian National Technical University, 220013, Nezavisimosti avenue, 65, Minsk, Belarus

Abstract

The article investigates the possibility of assessing the level and sign of residual stresses in coatings deposited by laser cladding by deflection of prismatic samples. It is shown that in multimodal coatings made of dissimilar materials (self-fluxing Ni-based alloy and bronze) tensile residual stresses are formed, the level of which is quite high. A comparison of the level of residual stresses in a multimodal coating with the level of residual stresses in homogeneous coatings made of an alloy based on nickel and bronze is made. It is shown that the level of residual stresses in multimodal coatings is 2.4 times higher than in a coating made of self-fluxing Ni-based alloy and 3.7 times higher than in a coating made of bronze. The regularity of the influence of the laser cladding speed on the level of residual stresses in multimodal coatings made of dissimilar materials has been established.

Keywords: Residual stresses, laser cladding, deflection, multimodal coatings, cladding speed.

УДК 621.7.043

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

*ПЕСИН Михаил Владимирович¹, доктор техн. наук, профессор,
e-mail: m.pesin@mail.ru*

МАКАРОВ Владимир Федорович¹, доктор техн. наук, профессор

МАКАРЕНКОВ Евгений Сергеевич¹, аспирант

ХАЛТУРИН Олег Александрович, старший преподаватель

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 6149990,
Российская Федерация, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29

Аннотация

В статье рассмотрена подготовка производства деталей, используемых в технологическом оборудовании при гидравлическом разрыве пласта. При этом необходимо обеспечить точность и качество поверхностей деталей нефтепромыслового и бурового оборудования. Рассмотрены методы конечно-элементного моделирования, описывающие величину и характер распределения остаточных напряжений в резьбе при обкатывании ее роликом; численное моделирование поверхностной пластической деформации, интегрированное в технологический процесс изготовления детали с резьбой. Использование инновационного метода позволило сократить время на разработку нового изделия и уменьшить расходы на технологическую подготовку производства.

Ключевые слова: резьба, упрочнение, бурильная труба, резьботочение, обкатывание роликами, гидроразрыв пласта, технологическая подготовка производства.

Введение

Широкое распространение в России занимает проведение гидроразрыва пласта (ГРП) с целью интенсификации добычи нефти и повышения величины извлекаемого флюида. На сегодня Российская Федерация находится на втором месте в мире после США по ежегодно проводимому количеству ГРП на нефтегазовых месторождениях. Общий объем превысил отметку 15000 операций в год и имеет тенденцию к росту, который обусловлен истощением легкодоступных углеводородных ресурсов и увеличением сложности нефтедобычи на вновь открываемых скважинах.

Заказчиками операций ГРП являются крупные нефтяные компании, в первую очередь ПАО «НК «Роснефть» и АО «Сургутнефтегаз», на долю которых приходится половина всего рынка. При выборе нефтесервисной компании для проведения ГРП заказчики ориентируются в первую очередь на уровень технологической оснащенности и успешный опыт проведения ГРП в прошлом. По мнению участников рынка, в краткосрочной перспективе от одного года до трех лет наиболее привлекательными регионами на рынке услуг ГРП будут Уральско-Поволжский регион (Пермский край, Татарстан, Башкирия, Самарская, Оренбургская области) Тюменская область (вместе с ХМАО и ЯНАО). Общий объем трудноизвлекаемых запасов здесь оценивается в 200 млрд тонн.

При разработке месторождений подрядчиками для обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации бурового и нефтепромыслового оборудования предъявляются повы-

шенные требования к сопротивлению усталости деталей технологического оборудования. Решение этой задачи обеспечивается техническими специалистами предприятий нефтяного машиностроения. Особенно это важно для повышения долговечности резьбовых соединений нефтепромыслового и бурового оборудования, увеличения износостойкости рабочих поверхностей деталей, сопротивлению коррозионному разрушению под нагрузкой и другим. Существуют различные методы для решения этой проблемы. Одним из основных является метод конечно-элементного моделирования остаточных напряжений в резьбе при воздействии на нее деформирующего ролика. Важным является оценка воздействия поверхностным пластическим деформированием (ППД) на резьбу и другие высоконагруженные поверхности, уменьшение времени на технологическую подготовку производства [14 - 19].

Гидроразрыв пласта осуществляется при использовании комплекса наземного и подземного оборудования. В проведении операций ГРП обычно задействован флот, состоящий из 10–20 крупноразмерных установок на грузовых шасси. В состав флота входит наземное оборудование, которое включает:

- насосные и пескосмесительные агрегаты для подготовки и закачки рабочих жидкостей;
- автоцистерны для доставки жидкостей гидроразрыва;
- специальную обвязку устья скважины с оборудованием;
- блок манифольда и различные емкости;

Подземное оборудование включает в себя:

- насосно-компрессорные трубы (НКТ) диаметром 89...114 мм из стали групп прочности «К», «Е», «Л», «М», «Р», по которым жидкость разрыва подается на забой;
- пакер, который полностью разобщает фильтровую зону скважины от ее вышележащей части.

По техническому заданию оборудование для проведения ГРП должно удовлетворять ряду требований:

- Возраст основного оборудования для ГРП (блендер, насосные агрегаты, станция контроля, гидратационная установка, агрегат для подачи хим. реагентов) не должен превышать 7-м лет;

- Обязательно наличие детального инвентарного списка всех элементов технологической обвязки и соединений высокого давления, результатов испытаний толщины стенок и испытаний на целостность (магнитная дефектоскопия или другие методы неразрушающего контроля);

- Неразрушающему контролю должны подвергаться все насосы высокого давления. Испытания должны проводиться в соответствии с требованиями изготовителей, но не реже, чем 1 раз в 12 месяцев.

- Все элементы линии высокого давления и устьевого арматуры должны обеспечивать возможность проведения ГРП с давлением не менее 68,9 МПа (10000 PSI) и скорость закачки до 10 (м³/мин);

- Проведение ревизии арматуры ГРП производится после каждого демонтажа оборудования. После проведения 6 операций ГРП или работ на скважине с многостадийным ГРП, но не реже чем 1 раз в 6 месяцев, необходимо проводить гидравлическое испытание на герметичность уплотнений и соединений;

- подвеска НКТ с максимальным рабочим давлением не менее 69 МПа (10000 PSI) диаметром 114,3 мм т. с. не более 8,56мм длиной 3100 м, с комплектом переводников, подвесных и подгоночных патрубков.

Однако соблюдение всех условий не гарантирует непрерывную работу оборудования без выхода из строя. Износ оборудования приводит к повышению аварийных ситуаций, увеличению времени простоя бригад КРС, к более длительному времени простоя скважины, снижению добычи, как следствие, потери прибыли. Именно поэтому повышение износостойкости оборудования, которое позволит продлить срок службы оборудования и снизить риск выхода из строя, является актуальной темой.

Резьбу изготавливают либо с применением пластической деформации или с использованием резания. Известно, что накатывание резьбы наиболее высокопроизводительный метод ППД, в результате которого получаем наклепанный слой, благоприятную текстуру волокон материала, улучшенную шероховатость поверхности.

При эксплуатации нефтепромыслового и бурового оборудования резьбовым соединениям предъявляются такие основные требования как число свинчиваний, отсутствие задиров и заклиниваний при работе, срезание, изменение профиля витков и другие.

В современном машиностроении распространены следующие основные методы упрочнения: дробеструйная обработка, накатка шариками или роликами, алмазное выглаживание и т.д. [1-3].

В результате процесса упрочнения наблюдается повышение микротвердости резьбовой поверхности, устранение явлений схватывания и задиров, формирование сжимающих остаточных напряжений, регулярный рельеф [4-9].

На сегодняшний день существуют два распространенных программных комплекса – ANSYS и ABAQUS, предназначенные для проведения многоцелевого инженерного многодисциплинарного анализа и для научно-исследовательской деятельности [10-12]. Известны исследования, проведенные в области моделирования ППД деталей в таких странах как:

США: Каллен Морисон, Emuge, Хемч; Richards M.D., Burnett M.E., Speer J.G. и Matlock D.K.;

Китай: You-Li Zhu, Kan Wang, Li Li и Yuan-Lin Huang;

Великобритания: Abrao A. M., Denkena B., Breidenstein B., Mo T; Majzoobi G. H., Zare Jouneghani F., Khademi E.;

Франция: Jasenko Perenda, Jovan Trajkovski, Andrej Žerovnik и Ivan Prebil;

Норвегия: Voskamp A.P., Mittemeijer E.J.;

Италия: Angelo Terranova и Laura Vergani.

Разработка методов математического моделирования упрочнения поверхностного слоя резьбовых соединений является одной из актуальных проблем для предприятий машиностроительной отрасли для определения величины и характера распределения остаточных напряжений.

Следует отметить, что направлением практического развития методов ППД является электромеханическая обработка (ЭМО) для решения вопроса о повышении износостойкости плунжеров насосов высокого давления и НКТ, используемых при проведении ГРП. Электромеханическая обработка – способ повышения износостойкости, прочности и предела выносливости деталей машин и технологического оборудования, основанный на использовании электрической энергии промышленной частоты (50 Гц), сконцентрированной в локальной области контакта «инструмент – обрабатываемая поверхность» и формирующий высокие эксплуатационные свойства поверхностного слоя изделий [21, 22].

К преимуществам ЭМО над другими способами относятся:

- Отсутствие обезуглероживания поверхностного слоя;
- Отсутствие окисления поверхностного слоя;
- Технологическая простота;

- Повышение износостойкости до 12 раз;
- Повышение предела выносливости на 30...200%;
- Закалка длинномерных и маложестких деталей.

Были проведены лабораторные исследования по использованию ЭМО на трубах НКТ и цилиндрах малого диаметра, получены первые результаты: заметно значительное повышение твердости поверхностного слоя оборудования, отверстий, резьб от 48 до 68. При этом в сердцевине значение твердости значительно меньше - 18-20 HRC.

После свинчивания резьбового соединения с некоторым моментом к соединению прикладывается вес колонны, который затем снимается формируя цикл нагружения. Получение напряжений в осевом сечении соединения для различных шагов нагружения позволяет оценивать изменения циклической прочности при варьировании различных исходных данных путём расчёта амплитуд и средних напряжений цикла в каждом узле модели и их приведения по зависимости Гудмана, к амплитудам эквивалентным напряжениям симметрично цикла нагружения.

На рис. 1 показана зависимость максимальных эквивалентных амплитуд напряжений в узлах модели от момента затяжки резьбового соединения после циклического нагружения для деталей изготовленных по середине поля допуска по стандарту, а также с различными отклонениями.

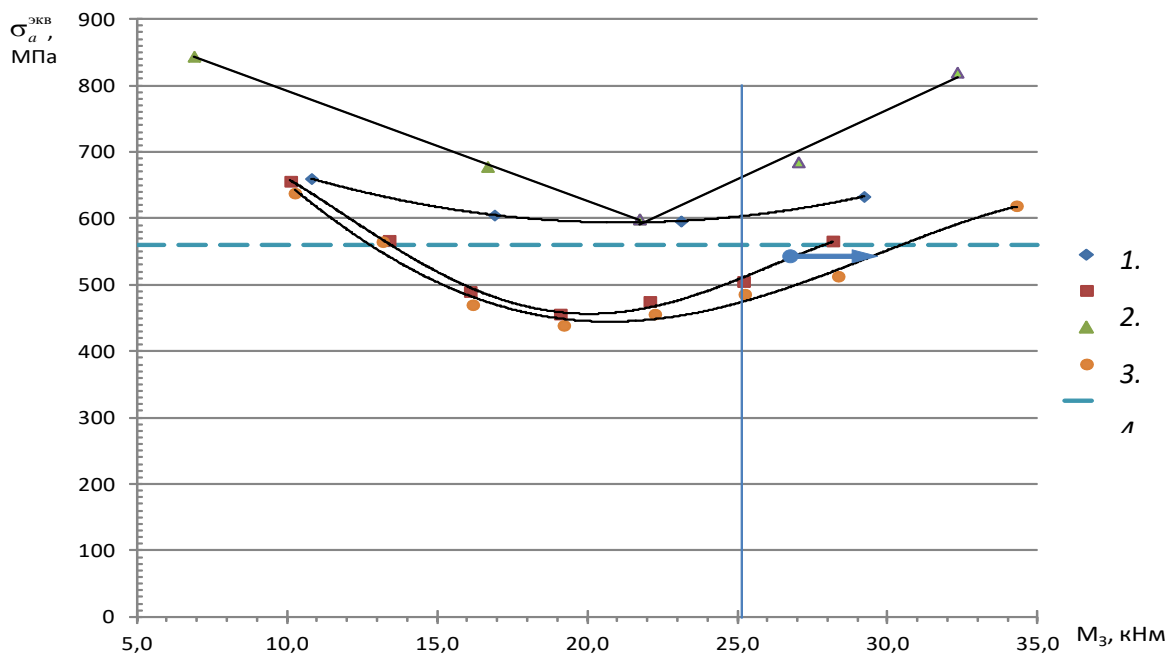


Рисунок 1 – Зависимость эквивалентных амплитуд напряжений от момента затяжки при отклонениях конусности (вертикальная линия – рекомендуемый производителем момент затяжки): 1 - конусность ниппеля минимальна, а муфты максимальна; 2 - середина поля допуска по конусности по ГОСТ Р 50864–96; 3 - конусность ниппеля максимальна, а муфты минимальна; 4 - середина поля допуска по конусности по ГОСТ 28487 и API 7; 5 - предел выносливости материала σ_{-1}

Анализ зависимости эквивалентных амплитуд напряжений от момента затяжки при отклонениях конусности показал преимущество полей допусков на конусность по *API spec 7* и ГОСТ 28487–2018 перед установленными в ГОСТ Р 50864–96. Выполнение изделий по середине поля допуска в соответствии с *API* позволяет повысить крутящий момент (рис. 1).

Выводы

Показана актуальность повышения надежности технологического оборудования, используемого для проведения ГРП.

Выявлены основные элементы системы технологического оборудования при проведении скважинных работ, требующие упрочнения: отверстия труб НКТ, резьба НКТ, плунжеры насосов.

Рассмотрены основные способы повышения износостойкости оборудования российских и зарубежных компаний;

Выявлен метод повышения износостойкости, проведены первые натурные исследования и испытания.

Использование упрочняющих технологий позволило на этапе проектирования и последующего изготовления изделий повысить их надежность.

С использованием математического моделирования описаны процессы постановки и решения задачи, определения величины и характера распределения остаточных напряжений в резьбе сформированных поверхностно пластическим деформированием.

Обеспечено прогнозирование технологических режимов процесса обкатывания резьбы нефтепромыслового и бурового оборудования.

Численное моделирование поверхностной пластической деформации, интегрированное в технологический процесс изготовления детали с резьбой, позволило сократить время на разработку нового изделия, а также уменьшить расходы на подготовку производства.

Показано, что комплексный подход к технологической подготовке производства позволит обеспечить точность и качество деталей, формирование благоприятных сжимающих напряжений и повышение надежности деталей оборудования при гидроразрыве пласта.

Такое сквозное моделирование позволяет наиболее оптимально подобрать параметры резьбы и наладки оборудования для вновь вводимых типоразмеров, а также дать рекомендации по сборке бурильных колонн включающие контроль момента затяжки при использовании ключей с автоматизированным считыванием текущих значений угла и момента свинчивания.

Список литературы

1. Лебеденко В. Г. Математическое моделирование процесса формирования геометрических параметров поверхностного слоя и параметров упрочнения при обработке деталей дробью // Вестник Донского государственного технического университета, №4, 2008. С 202-2012.
2. Песин М. В. К моделированию обкатки резьбовой поверхности бурильных труб // «Академический журнал Западной Сибири», №4 (47), 2013. С. 27-28.
3. Песин М. В. Повышение надежности резьбовых соединений нефтегазовых изделий // Технология машиностроения - М. №9. 2011. С.49- 50.
4. Песин М. В. Повышение надежности резьбовых соединений труб / СТИН. 2011, №11. С. 39-40.

5. Песин М. В. Повышения надежности бурильных труб на стадии проектирования путем использования математического моделирования процесса упрочнения резьбовой поверхности / М.В. Песин, Е.Д. Мокроносов // «Экспозиция Нефть Газ», №2 (27), 2013. С. 56-57.
6. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. В 2-х томах. Т. 2. / С. К. Амбросимов, А. Н. Афонин, А. П. Бабичев и др. Под общ. ред. А. Г. Суслова. — М.: Машиностроение, 2014. — 444 с.
7. Справочник технолога – машиностроителя. В 2 т. Т.2 / В.Н. Андреев, А.Н. Афонин, В.Ф. Безъязычный и др. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – 818 с.
8. Афонин, А. Н. Резьбонакатывание. Библиотека технолога. [Текст] / А.В. Киричек, А.Н. Афонин. - М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
9. Pesin M.V. Improving the Reliability of Threaded Pipe Joints // Russian Engineering Research. - 2012. - Vol. 32. - №2. - P. 210-212.
10. Macdonald K. A. Failure analysis of drillstrigs // Engineering Failure Analysis. - 2007. - №14. - P. 1641-1666.
11. Xiao-Hua Zhu The parameter sensibility analysis for fishing box tap based on the overall process of elastoplasticity in oil and gas wells // Mathematical and Computer Modeling. - 2013. - №58. - P. 1540-1547.
12. Fares Y. Determining the life cycle of bolts using a local approach and the Dang Van criterion // Fatigue & Fracture & Engineering Materials & Structures. - 2006. - №29. - P. 588-596.
13. Блюменштейн В. Ю. Механика технологического наследования на стадиях жизненного цикла ответственных деталей машин Энциклопедия поверхностного пластического деформирования / Под ред. д-ра техн. наук, профессора С. А. Зайдеса. – Иркутск, Изд-во ИРНИТУ, 2015. – С. 46-52.
14. Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С. Моделирование остаточных напряжений на стадиях жизненного цикла изделий / Вестник машиностроения. – 2014. – №12. – С. 21-25.
15. Блюменштейн В. Ю., Киричек А. В., Бабичев А. П. Современные конкурентоспособные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием / Справочник. Инженерный журнал. – 2011. –№ 5. – С. 47-52.
16. Афонин А. Н., Мартынов Е. М. Упрочнение крупногабаритных резьб деталей машин горно-металлургического оборудования. Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: Матер. XII Всеросс. Научно-практич. конф. с международным участием. – Старый Оскол. 2015. – Т.II. – С. 79-82.
17. Афонин А. Н., Саввин В. В., Киричек А. В., Моделирование накатывания с полнопрофильной схемой деформирования внутренних трапецеидальных резьб методом конечных элементов. / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2013, №4 (300). – С.61-67.
18. Кузнецов В. П., Горгоц В. Г., Математическое моделирование нелинейной динамики процесса упругого выглаживания поверхностей деталей / Вестник машиностроения. 2008. № 12. С. 61-65.
19. Кузнецов В. П. Методика определения параметров инструмента для упругого выглаживания деталей на основе моделирования нелинейной динамики процесса / Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 3. С. 18-26.
20. Песин М. В. Повышение долговечности резьбовых соединений технологическими методами / Е. Е. Ермаков, М. А. Баева // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. «Горная и нефтяная электромеханика – 2015», (Пермь, XII Международная научно – практическая конференция «Инновации в машиностроении»

12-15 окт. 2015 г. / Перм. науч. исслед. политехн. ун-т [и др.]. – Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2015. – С.297-303.

21. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. М.: Машиностроение. 1989. 200 с.

22. Федоров С.К., Федорова Л.В. Восстановление резьбы электромеханической обработкой // Вестник УлГТУ 1-2 -2003. – с.36-39.

TECHNOLOGICAL AND STRUCTURAL QUALITY ASSURANCE OF EQUIPMENT PARTS FOR HYDRAULIC FRACTURING

Pesin M.V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: m.pesin@mail.ru

Makarov V.F., D.Sc. (Engineering), Professor,

Makarenkov E.S., Post-Graduate Student

Khalturin O.A., senior lecturer

Perm National Research Polytechnic University, 614990, Komsomolsky pr. 29, Perm, Perm region, Russian Federation

Abstract

The article discusses the preparation of the production of parts for oilfield and drilling equipment, which ensures the accuracy and quality of the surfaces of the parts. The methods of finite element modeling, describing the magnitude and nature of the distribution of residual stresses in the thread when rolling it with a roller, are considered; numerical modeling of surface plastic deformation integrated into the technological process of manufacturing a threaded part. The use of an innovative method made it possible to reduce the time for developing a new product and reduce the cost of technological preparation of production.

Keywords: thread, hardening, drill pipe, deep rolling, threading, rolling with rollers, the hydraulic fracture, technological preparation of production.

УДК 621.787

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

*МИРОШИН Игорь Викторович, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: imiroshin@rambler.ru*

*ПЕТРЕНКО Константин Петрович, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: konst.petr@mail.ru*

Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, 650000,
Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Аннотация

Приведены результаты исследований шероховатости поверхностного слоя при алмазном выглаживании образцов из коррозионностойкой стали, применяемой для изготовления деталей центробежных насосов. Установлено, что алмазное выглаживание способствует интенсивному снижению шероховатости поверхности. Выявлено, что повышение силы выглаживания до определенного предела приводит к снижению шероховатости, дальнейшее возрастание усилия приводит к повышению шероховатости благодаря перенаклепу и частичному разрушению поверхностного слоя.

Ключевые слова: алмазное выглаживание, шероховатость поверхности, центробежные насосы, износ.

Введение

Насосы для перекачивания агрессивных сред представляют собой разнообразные по конструктивному исполнению устройства, изготавливаемые из материалов, устойчивых к воздействию окружающей среды. Это касается, в первую очередь, деталей проточной части. В таких отраслях как химическая, целлюлозно-бумажная, нефтеперерабатывающая, пищевая, мясомолочная промышленность, а также грузовой железнодорожный и морской транспорт, для изготовления деталей насосов применяются коррозионностойкие стали, характеризующиеся высокой стойкостью в агрессивных средах. На рисунке 1 представлен продольный разрез горизонтального насоса с осевым подводом жидкости типа X исполнения Д. Т. Л.

Защитные втулки (позиция 8 на рисунке 1) в насосах используются в узлах пар трения скольжения для защиты вала от износа и коррозии. Они являются экономичной альтернативой замене или трудоёмкому процессу восстановления изношенных валов. По технологическому процессу втулки изготавливаются из коррозионностойкой стали аустенитного класса 12X18H10T, химический состав которой указан в таблице 1.

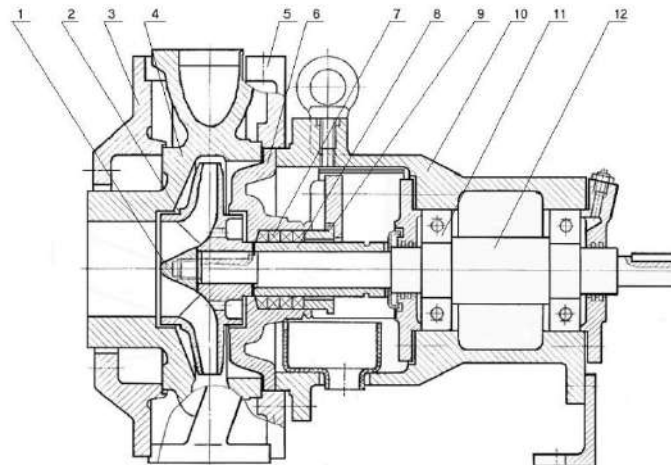


Рисунок 1 – Продольный разрез центробежного насоса: 1 – гайка рабочего колеса, 2 – колесо рабочее, 3, 5 – прижимные фланцы, 4 – корпус насоса, 6 – корпус сальника, 7 – набивка сальника, 8 – защитная втулка, 9 – крышка сальника, 10 – кронштейн, 11 – подшипник, 12 – вал

Таблица 1 – Химический состав, % стали 12X18H10T

C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti
<0,12	<0,8	<2,0	17,0 – 19,0	9,0 – 11,0	5·C – 0,8

Характер износа защитных втулок в процессе эксплуатации претерпевает изменения. На первом этапе при малых величинах износа втулка изнашивается равномерно. В процессе увеличения износа под действием дисбалансов рабочих колес и моментов сил сопротивления вал может терять прямолинейность, а втулка вследствие этого изнашивается односторонне. Таким образом, актуальной является задача повышения износостойкости защитных втулок и сохранения их геометрических параметров за счет применения рациональной упрочняющей обработки, обеспечивающей оптимальные параметры качества поверхностного слоя.

Одним из методов поверхностного упрочнения, обеспечивающих высокое качество поверхностного слоя и эксплуатационные характеристики, является алмазное выглаживание, которое позволяет значительно снизить шероховатость, эффективно упрочнить поверхностный слой и создать в нем сжимающие остаточные напряжения. Это, в свою очередь, повышает износостойкость, усталостную прочность и долговечность деталей машин [1-3]. Дополнительными преимуществами алмазного выглаживания являются возможность упрочнения маложестких деталей без нарушения их геометрической формы, а также возможность обработки материалов с высокой твердостью.

Описание теоретических и экспериментальных исследований

Известно, что одним из ключевых факторов, влияющих на износостойкость, является шероховатость поверхности, в связи с чем в данной работе исследовалось влияние технологических режимов выглаживания на параметры шероховатости поверхностного слоя. С этой целью были изготовлены гладкие цилиндрические образцы из стали 12X18H10T (рисунок 2).



Рисунок 2 – Экспериментальные образцы

На каждом образце имелось пять рабочих участков, отделенных друг от друга поперечными канавками для выхода инструмента и позволяющими выполнять исследования нескольких режимов выглаживания на одном образце. Установка образцов в передний и задний центры станка осуществлялась с помощью центровых отверстий. Инденторы (рисунок 3) устанавливались в упругую державку (рисунок 4).



Рисунок 3 – Инденторы



Рисунок 4 – Упругая державка

Радиальное усилие обеспечивалось упругим элементом державки, который тарировался, в результате чего строился тарировочный график «перемещение – усилие». В ходе проведения исследований усилие выглаживания контролировалось по перемещению упругого элемента державки. Профильный радиус индентора составлял 0,8 мм и 4 мм, усилие варь-

ировалось в диапазоне 10 – 45 кгс. Подача составляла 0,04 мм/об. В процессе изготовления образцы обрабатывались до шероховатости Ra 2 -3 мкм.

Шероховатость обработанной поверхности определялась по профилограмме поверхности с помощью профилографа-профилометра «Talysurf 5M». Формировался массив координат точек профилограммы, координаты пересчитывались в реальные путем деления соответственно на горизонтальное и вертикальное увеличение. Далее по методу наименьших квадратов определялось положение средней линии, после чего оценивались отклонения точек профиля от средней линии. Затем рассчитывались параметра шероховатости поверхности: среднеарифметическое отклонение профиля Ra , полная высота профиля $Rmax$ и средний шаг неровностей профиля Sm (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты исследований шероховатости

$R_{пр}$, мм	Усилие, кг	Ra , мкм	$Rmax$, мкм	Sm , мм	$R_{пр}$, мм	Усилие, кг	Ra , мкм	$Rmax$, мкм	Sm , мм
4	15	1,15	5,9	0,09	0,8	10	1,61	8,23	0,09
4	20	0,94	5,2	0,05	0,8	35	0,46	2,76	0,019
4	25	0,62	3,2	0,018	0,8	40	0,31	2,46	0,014
4	30	0,36	2,8	0,015	0,8	45	0,42	3,6	0,02

Результаты и обсуждение

На рисунках 5-7 приведены зависимости параметров шероховатости поверхности от режимов выглаживания.

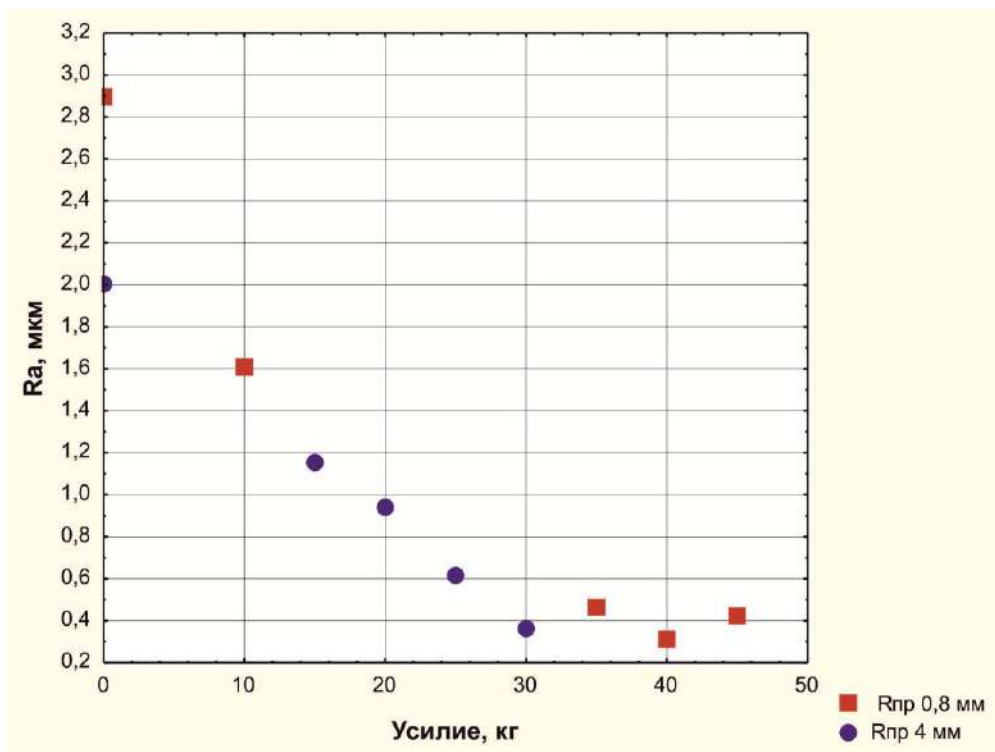


Рисунок 5 – Влияние режимов на параметр Ra

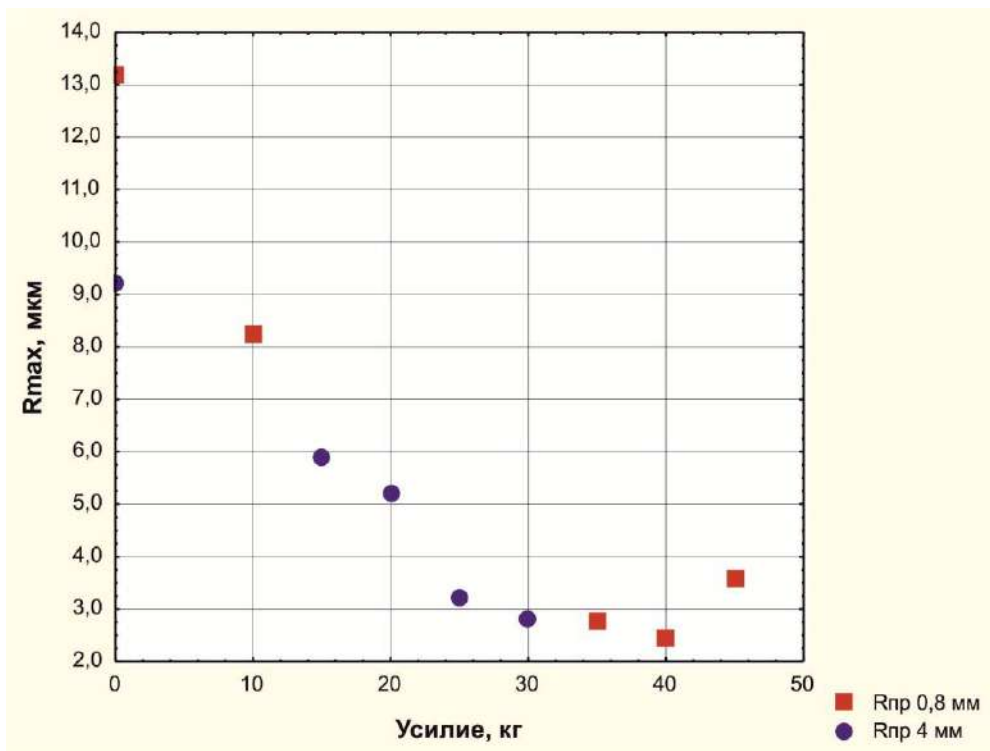


Рисунок 6 – Влияние режимов на параметр R_{max}

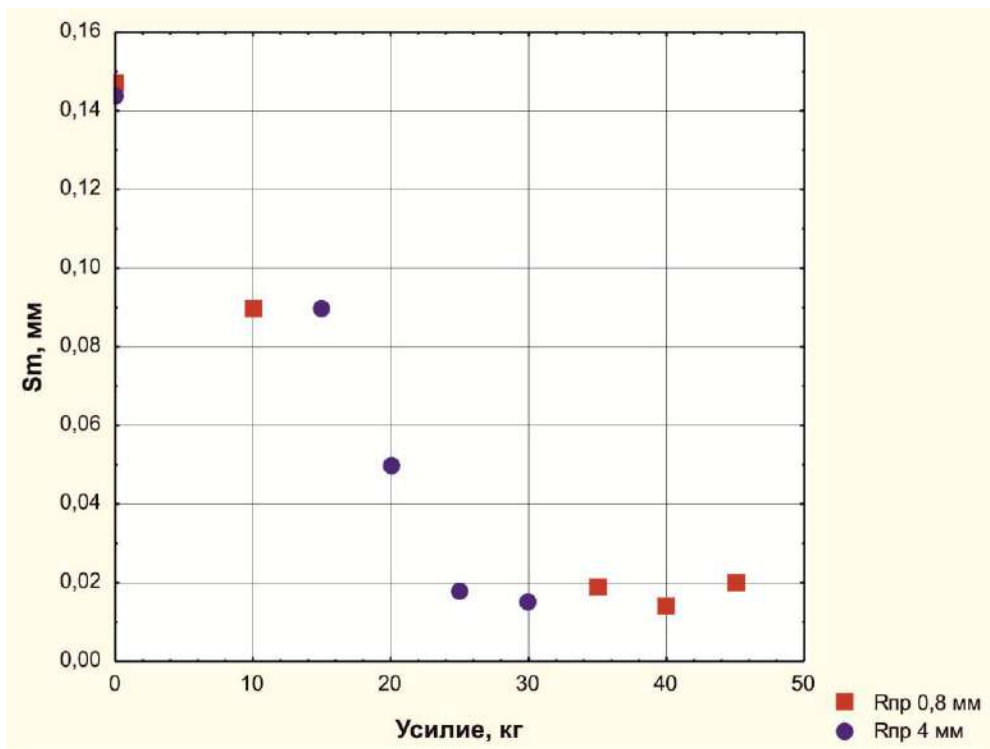


Рисунок 7 – Влияние режимов на параметр S_m

Анализ приведенных зависимостей показывает, что с увеличением усилия обкатывания параметры шероховатости существенно снижаются. Это происходит вследствие увеличения глубины внедрения выглаживателя и площади контакта инструмента с поверхностным слоем.

В случае применения индентора с радиусом 4 мм снижение параметров шероховатости наблюдается во всем диапазоне усилий. При использовании индентора с радиусом 0,8 мм минимальные значения всех параметров шероховатости наблюдаются при усилии 40 кг, дальнейшее возрастание усилия приводит к увеличению параметров шероховатости. На наш взгляд, это связано с тем, что при использовании индентора с малым радиусом возникают высокие удельные давления на поверхностный слой. Превышение некоторого оптимального усилия (в нашем случае 40 кг) приводит к искажению микронеровностей и перенаклепу, который вызывает частичное разрушение поверхностного слоя.

Выводы

1. Установлено, что алмазное выглаживание является эффективным способом снижения шероховатости и формирования благоприятного микрорельефа поверхности.
2. Возрастание усилия выглаживания приводит к закономерному снижению всех параметров шероховатости поверхности.
3. Для каждого сочетания технологических параметров существует оптимальное усилие выглаживания, при превышении которого параметры шероховатости возрастают.
4. Алмазное выглаживание может быть применено для снижения шероховатости и повышения износостойкости деталей центробежных насосов.

Список литературы

1. Смелянский, В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. Москва : Машиностроение, 2002. – 300 с. – Текст : непосредственный.
2. Торбило, В. М. Алмазное выглаживание. Москва : Машиностроение, 1972. – 105 с. – Текст : непосредственный
3. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. Москва : Машиностроение, 1987. – 328 с. – Текст : непосредственный.

THE EFFECT OF DIAMOND BURNISHING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS OF ROTARY PUMPS PARTS

Miroshin I.V., Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: imiroshin@rambler.ru

Petrenko K.P., Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: konst.petr@mail.ru

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

Abstract

In this paper, results of surface roughness research in processes of diamond burnishing of austenitic stainless steel specimens are presented. It is well known that surface roughness is one of the key factors that affect wear resistance. In this connection, the work was carried out to examine diamond burnishing conditions on surface roughness parameters. It was found that diamond burnishing contributes to drastic reduction of surface roughness. In addition, it was established that burnishing force increase to certain limits causes reduction of surface roughness parameters, while further force boosting produces increased surface roughness. This effect occurs due to “over-hardening” and partial damage of surface layer. Results obtained demonstrate that diamond burnishing is a suitable method for surface roughness reduction and wear resistance of rotary pumps parts.

Keywords: diamond burnishing, surface roughness, rotary pumps, wear.

УДК 621.763:627.787.4

**НАПЫЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 30ХГСА
МЕТОДОМ ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ***КОРОТИН Владимир Олегович¹, аспирант КузГТУ,
e-mail: korotinv@kuzstu.ru*¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28**Аннотация**

В статье рассмотрен один из методов формирования коррозионностойких покрытий – гиперзвуковая металлизация. Представлена методика нанесения покрытия на образцы. Представлены результаты измерения микротвердости.

Ключевые слова: поверхностный слой, эксплуатационные свойства, комбинированная обработка, поверхностное пластическое деформирование, гиперзвуковая металлизация.

Введение

Надежность работы горно-шахтных машин связана с качеством поверхностного слоя деталей, которое характеризуется геометрическими и физико-механическими параметрами [1]. При эксплуатации составные части и отдельные детали горного оборудования контактируют друг с другом и с окружающей средой. От качества поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства – сопротивление усталости, износостойкость, коррозионная стойкость, сопротивление контактной усталости и др. В связи с интенсификацией эксплуатационных процессов, увеличением скоростей перемещения рабочих органов, повышением температур и давлений роль качества поверхностного слоя значительно возрастает [2]. Связь характеристик качества поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами деталей свидетельствует о том, что оптимальная поверхность должна быть достаточно твердой, иметь сжимающие остаточные напряжения, мелкодисперсную структуру, сглаженную форму микронеровностей с большой площадью опорной поверхности.

В настоящее время в процессах изготовления широко используется хромирование, а в процессах восстановления – наплавка изношенных поверхностей штоков, цилиндров и др. [3-4] Указанные технологии в ряде случаев не обеспечивают требуемое качество и долговечность, и восстановление ресурса до требуемого уровня. Кроме того, применение хромирования повышает экологическую нагрузку и создает существенные проблемы в процессе утилизации электролитов, является дорогостоящим методом упрочнения.

Кроме хромирования существуют такие технологии упрочнения поверхностного слоя штоков гидроцилиндров, как поверхностное пластическое деформирование (ППД), гиперзвуковая металлизация (ГМ), нанесение износостойких покрытий и комбинированной обработки композиционных покрытий с псевдосплавной структурой и др. [5-6].

Высокую эффективность упрочнения поверхностного слоя деталей показывает гиперзвуковая металлизация (ГМ), разработанная проф. М.А. Белоцерковским. Данная технология позволяет отказаться от применения хромирования и может использоваться как в процессах изготовления, так и в процессах восстановления/ремонта деталей силовой гидравлики.

Процесс ГМ объединяет преимущества методов традиционной электродуговой металлизации и высокоскоростного напыления благодаря наличию высокоэффективной камеры сгорания пропано-воздушной смеси. Прочность сцепления наносимого покрытия методом ГМ вдвое превышает прочность сцепления слоев, полученных традиционной электродуговой металлизацией. Области промышленного использования данного метода: восстановление шеек всех типов коленчатых валов, штоков, нанесение антикоррозионных покрытий, восстановление посадочных мест под подшипники и т.п.

Цель проведения экспериментальных исследований заключается в оценке возможности применения гиперзвуковой металлизации (ГМ) в сочетании с поверхностным пластическим деформированием (ППД) для упрочнения поверхностного слоя деталей силовой гидравлики, в частности, упрочнения штоков гидроцилиндров механизированных шахтных крепей.

Описание экспериментальных исследований

Экспериментальные образцы изготавливались из стали 30ХГСА ГОСТ 4543-2016 одной поставки (табл. 1-2).

Выбор стали 30ХГСА в качестве основного материала для исследований обусловлен тем, что из данного материала изготавливаются штоки гидроцилиндров механизированных шахтных крепей.

Таблица 1 – Химический состав стали 30ХГСА ГОСТ 4543-2016

C, %	Mn, %	Si, %	Ni, %	S, %	P, %	Cr, %	Cu, %	Fe, %
0,28-0,34	0,90-1,20	0,80-1,10	до 0,30	до 0,03	до 0,03	0,80-1,10	до 0,30	~96

Таблица 2 – Механические свойства стали 30ХГСА ГОСТ 4543-2016

$\sigma_{0,2}$ (МПа)	σ_B (МПа)	δ_5 (%)	ψ %	КСУ (кДж/м ²)
830	1080	10	45	49

Учитывая особенности метода гиперзвуковой металлизации, образцы для экспериментальных исследований выполнялись в виде валов. Длина вала:

- должна быть такой, чтобы площадь распыления проволоки покрывала образец полностью за один рабочий ход;
- должна быть такой, чтобы была возможность произвести обкатывание роликом;
- должна учитывать возможность выполнения нескольких измерений остаточных напряжений после ППД.

С учетом перечисленных требований диаметр образца составил $20 \pm 0,26$ мм, длина $80 \pm 0,37$ мм (рисунок 1).

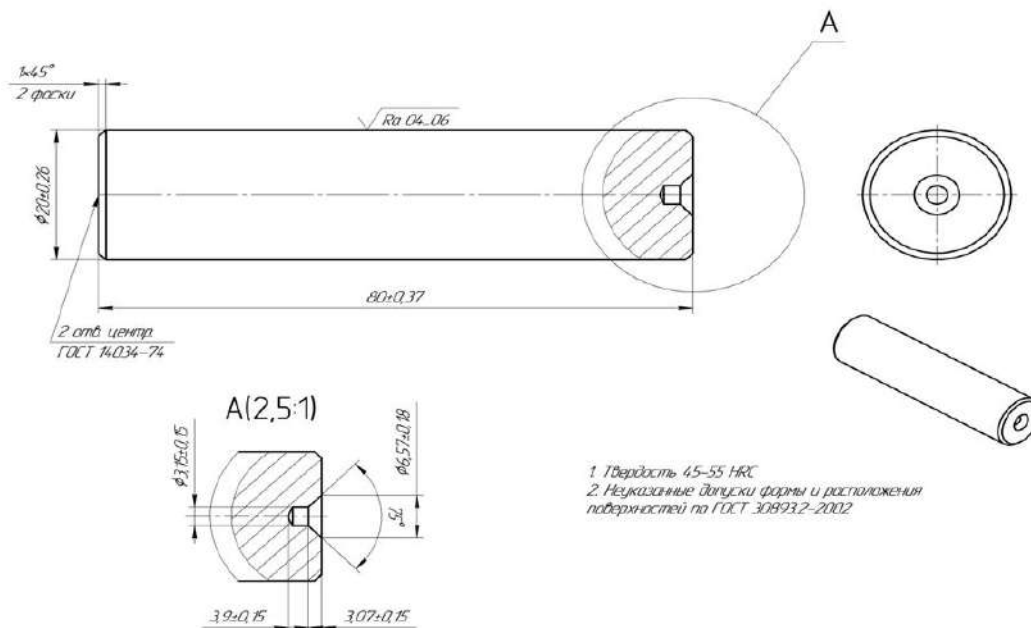


Рисунок 1 – Эскиз образца

Результаты и обсуждение

ГМ выполнялась с помощью установки модели АДМ-10 в Объединенном институте машиностроения НАН Республики Беларусь (рис. 3). На поверхность образца наносился сплав X20H80. Толщина напыляемого слоя – 0,25 мм, количество ходов – 3, общая толщина покрытия – 0,75 мм. Программа проведения ГМ приведена в таблице 3.

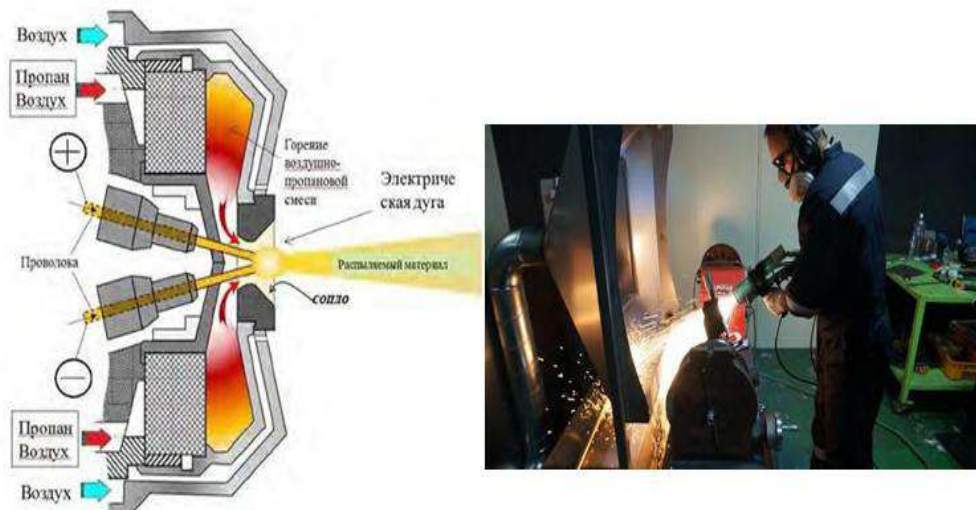


Рисунок 2 – Схема распылительной головки установки гиперзвуковой металлизации (а) и установка ГМ в работе (б)

Таблица 3 – Программа экспериментальных исследований

<i>ГМ</i>			
№ образца	Сила тока, А	Производительность процесса распыления (кг/ч) стальных проволок различного диаметра	Пористость покрытий (%) при различной скорости перемещения металлатора (м/с)
		2,0 мм	
1	60	1,5	1,3
2	100	4,5	1,4
3	200	8,0	1,5
4	300	14,0	1,6
5	400	16,0	1,8
6	450	18,0	1,8

После выполнения ГМ образцы имели вид, представленный на рисунке 3.



Рисунок 3 – Эскиз образца

После гиперзвуковой металлизации было произведено измерение твердости образцов после ГМ. График измерения твердости поверхностного слоя приведен на рис. 4.

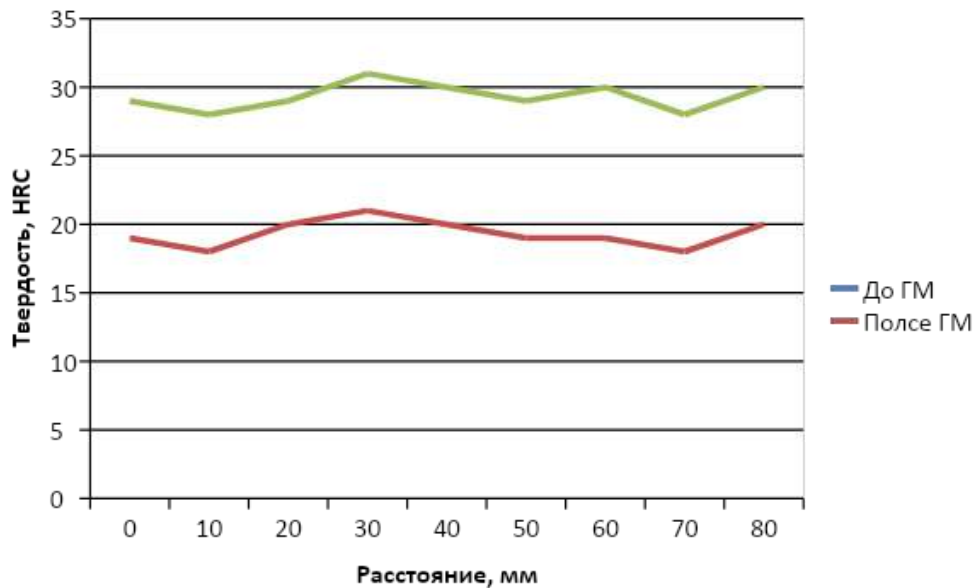


Рисунок 4 – График измерения микротвердости до и после ГМ

Из данного графика видно, что твердость образца увеличилась в среднем на 10 единиц. Средняя твердость до ГМ составляла 20 HRC, средняя твердость после ГМ составила 30 HRC.

В связи с этим можно сделать вывод, что, увеличив твердость поверхностного слоя, увеличивается износостойкость, коррозионная стойкость и жаростойкость. Это одна из важных составляющих нашей цели исследования, так как материал для изготовления штоков гидроцилиндров должен обладать высокими прочностными характеристиками. Это важно, так как штоки гидроцилиндров находятся в контакте с агрессивной средой и подвержены высокой коррозии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00587.

Список литературы

1. Смелянский В.М., Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А. Информационная поддержка жизненного цикла упрочненных ППД деталей машин. функциональная модель механики технологического наследования//Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. № 1. – С. 14-23.
2. Blumenstein V., Mahalov M., Ostanin O. Simulation and calculation of residual stresses in mining machines components//сборник: E3S Web of Conferences. 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition. 2018.
3. Panteleyenko F., Ostanin O., Panteleyenko K., Petrishin G. New boron-containing materials for surface hardening//сборник.: МАТЕС Web of Conferences. The conference proceedings (ISPCIME-2019). – 2019. – С. 05011.
4. Афанасьев В.К. Наплавочные сплавы/ Афанасьев В.К., Смирнов А.Н., Гладышев С.А., Блюменштейн В.Ю., Токарев А.О., Чибряков М.В., Никитенко С.М., Кольба А.В., Зырянов А.П., Мартынов М.А., Сочнев А.В., Толстогузов В.Н., Масляев М.В.//учебное пособие. – Кемерово, 2005.

5. Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Махалов М.С. Современные конкурентоспособные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием/Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 7. С. – 7-12.

6. Зайдес С.А. Технологические процессы поверхностного пластического деформирования// Асланян И.Р., Блюменштейн В.Ю., Бубнов А.С., Вулых Н.В., Зайдес С.А., Кадошников А.В., Киричек А.В., Климова Л.Г., Кургузов С.А., Лебский С.Л., Лесняк С.В., Мальсагов А.А., Мальсагова Т.Р., Матлин М.М., Мозгунова А.И., Мураткин Г.В., Никитин Ю.В., Платов С.И., Подольский М.А., Попов М.Е. [и др.]//Монография. Представлено к изданию Иркутским государственным техническим университетом. – Иркутск, 2007.

SPRAYING OF SAMPLES MADE OF 30XGSA STEEL BY THE METHOD OF HYPERSONIC METALLIZATION

V. Korotin, postgraduate,
e-mail: korotinv@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University after, 650000, Kemerovo, Vesennyaya, 28

Abstract

The article considers one of the methods of forming corrosion – resistant coatings-hypersonic metallization. The method of coating the samples is presented. The results of microhardness measurement are presented.

Keywords: surface layer, operational properties, combined processing, surface plastic deformation, hypersonic metallization.

УДК 621.787.4

МКЭ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБКАТЫВАНИЯ РОЛИКОМ ВОЛНООБРАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*УЧАЙКИН Сергей Евгеньевич¹, аспирант,
e-mail: uchaikinserega@mail.ru*

¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Аннотация

Разработана методика обработки криволинейной поверхности обкатыванием роликом. Выполнено МКЭ моделирование обработки обкатыванием роликом криволинейной поверхности с использованием корректировок по натягу.

Ключевые слова: качество поверхностного слоя, поверхностное пластическое деформирование, очаг деформации, напряженно-деформированное состояние, стационарность (квазистационарность), галтельные переходы, МКЭ моделирование.

Введение

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) – метод, при реализации которого упрочняется поверхностный слой (ПС), повышается износостойкость, усталостная прочность, стойкость к коррозионным воздействиям и т.д. Процесс обработки деталей обкатыванием роликом позволяет повысить запасы усталостной прочности в 1,5-3 раза, и увеличить срок службы деталей в десятки раз [1].

Известно, что для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик детали необходимо обеспечить равномерность распределения свойств по всем ее сечениям: на малых и больших диаметрах, на галтельных переходах и других геометрических элементах сложно-профильных поверхностей. Процессы обработки обкатыванием цилиндрических и галтельных участков различаются. Стационарный процесс обработки на цилиндрических участках, который достигается спустя несколько оборотов детали, позволяет получить равномерное распределение напряженно-деформированное состояние (НДС) в ПС детали. При обработке галтелей данной картины течения металла добиться значительно труднее [2].

Было выполнено МКЭ моделирование процесса обкатывания роликом галтельного перехода усталостного образца и образца с криволинейной поверхностью. Моделировалась обработка по жесткой схеме с постоянным натягом по всей длине обрабатываемой поверхности [3-4].

В результате выявлено, что при данных схемах распределение параметров НДС в ПС неравномерное по всей обрабатываемой поверхности. Об этом также свидетельствовало разное волнообразование на разных участках криволинейной поверхности. Для обеспечения стационарности процесса необходимо чтобы в процессе обработки геометрия очага деформации (ОД) была неизменна, либо практически неизменна (квазистационарна) [1-2].

Было принято решение о выполнении МКЭ моделирования обкатывания роликом криволинейной поверхности с применением корректировок в виде изменения натяга на разных участках криволинейной поверхности. Для решения этих задач была разработана методика, которая заключалась в изменении натяга в большую сторону на участках с меньшими

сжимающими напряжениями и в меньшую сторону на участках с большими сжимающими напряжениями в ПС.

Результаты и обсуждение выполненных исследований

Исходя из того, что подавляющее большинство валов работают при циклических знакопеременных нагрузках, при ППД важно обеспечить равномерное распределение в ПС осевого компонента σ_x [5]. Примем за основу осевой компонент σ_x после последнего шага решенной задачи с постоянным натягом и разобьем поверхность на участки по распределению максимальных сжимающих напряжений (рис. 1). Стоит отметить, что точки, через которые проходят прямые линии при разбиении, являются центрами дуг окружностей при построении профиля поверхности. Необходимость разбиения именно таким образом обусловлена особенностью постановки при решении задач с корректировками.

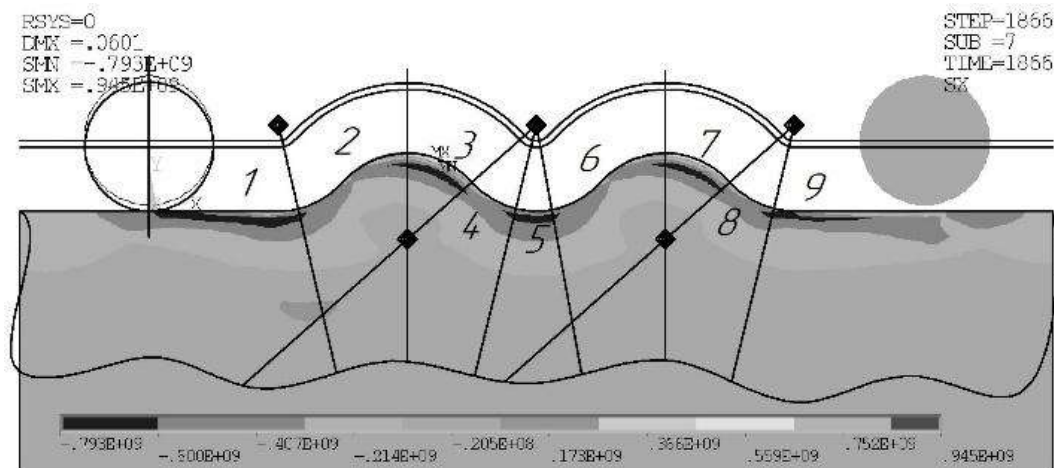


Рисунок 1 – Схема разбиения поверхности по численным значениям напряжений на участки

Таким образом получается, что участки 1,3,5,7 и 9 (нечетные участки) имеют максимальные сжимающие напряжения, а участки 2, 4, 6 и 8 (четные участки) имеют меньшие сжимающие напряжения.

Были решены следующие задачи:

- плавное увеличение натяга по нечетным участкам на максимальное значение до 0,05 мм (в середине участка суммарное максимальное значение натяга $0,05+0,05=0,1$ мм). При этом основывались на результатах решения первой задачи (выбор зон) (рис. 2).
- плавное увеличение натяга по нечетным участкам на максимальное значение до 0,1 мм (в середине участка суммарное максимальное значение натяга $0,1+0,05=0,15$ мм). При этом основывались на результатах решения первой задачи (выбор зон) (рис. 3).
- плавное увеличение натяга на нечетных участках и плавное уменьшение натяга на четных участках. При этом основывались на результатах решения первой задачи (выбор зон). Увеличение и уменьшение натяга приняли на 0,5 мм (в середине участка) (рис. 4).

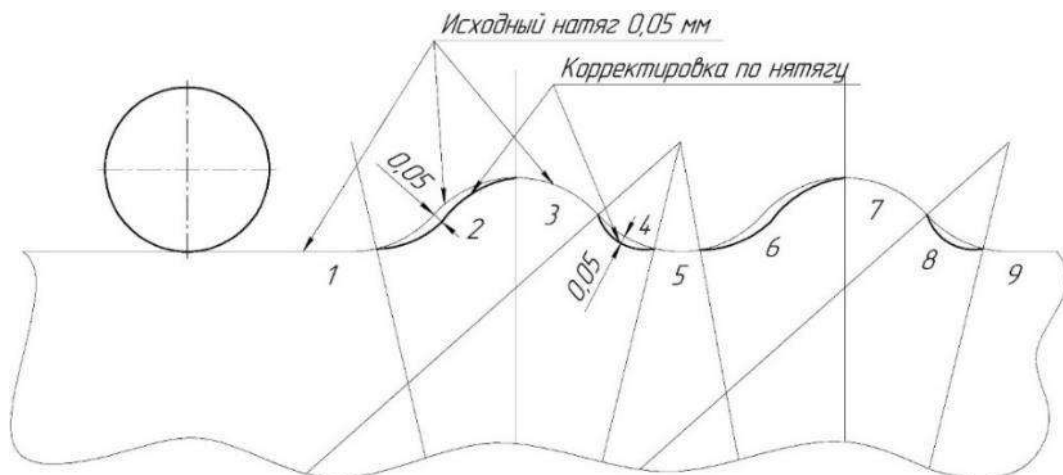


Рисунок 2 – Схема корректировок при решении второй задачи

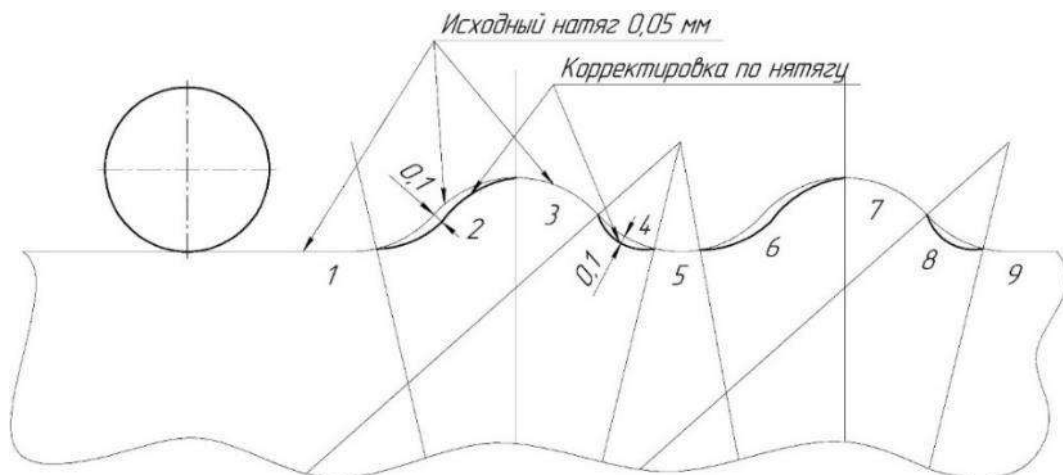


Рисунок 3 – Схема корректировок при решении третьей задачи

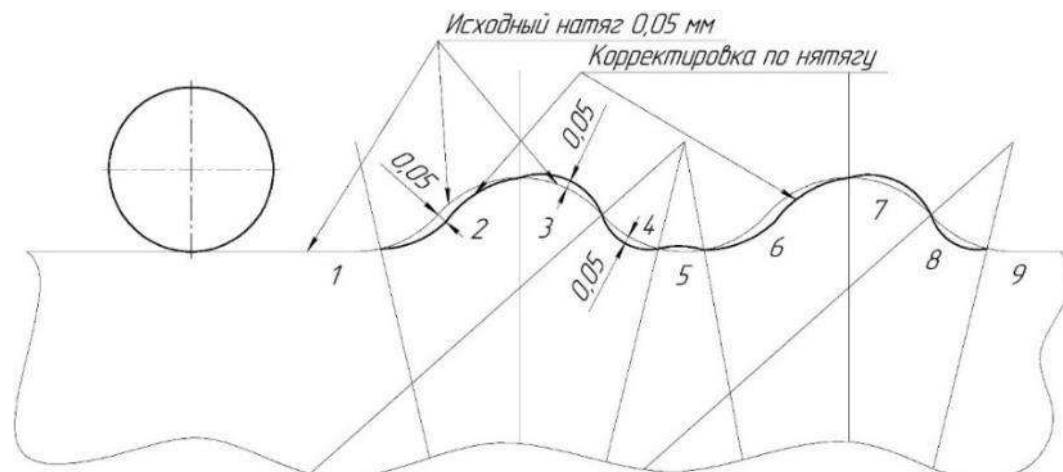


Рисунок 4 – Схема корректировок при решении четвертой задачи

Рассмотрим подробнее значения компонент НДС на двух последних шагах моделирования всех 3-х задач с корректировками по натягу.

При решении второй задачи с корректировками распределение осевого компонента (рис. 5) при нагрузке меняется в диапазоне от -1360 до 1410 МПа, а при разгрузке в диапазоне от -808 до 1410 МПа. При нагрузке наблюдается практически равномерный поверхностный слой со сжимающими напряжениями до 435 МПа. Максимальные значения до 1050 МПа на выпуклых частях поверхности. При разгрузке на всем протяжении обработанной поверхности наблюдается слой со сжимающими напряжениями до -561 МПа с участками до -808 МПа. При нагрузке и разгрузке на выпуклых частях поверхности, при спуске, наблюдаются растягивающие напряжения до 1410 МПа.

При решении третьей задачи с корректировками (рис. 6) осевой компонент при нагрузке меняется в диапазоне от -1370 до 1670 МПа, а при разгрузке в диапазоне от -799 до 1670 МПа. При нагрузке на всем протяжении обработанной поверхности наблюдается слой со сжимающими напряжениями до -693 МПа. На стадии разгрузки наблюдается неравномерный слой сжимающих напряжений до -540 МПа с участками до -799 МПа. Также на выпуклых частях поверхности, при спуске, наблюдаются растягивающие напряжения до 1670 МПа.

На рис. 7 представлен осевой компонент после решения 4-й задачи с корректировками. При нагрузке меняется в диапазоне от -1360 до 1200 МПа, а при разгрузке в диапазоне от -790 до 1210 МПа. В обоих случаях на всем протяжении обработанной поверхности наблюдается относительно равномерный слой со сжимающими напряжениями до -790 МПа. При этом, максимальные значения присутствуют не на всем протяжении поверхностного слоя. Также, можно отметить, что наименьшая глубина распределения сжимающих напряжений находится на переходе с первого цилиндрического участка на выпуклый, как и с вогнутого на выпуклый.

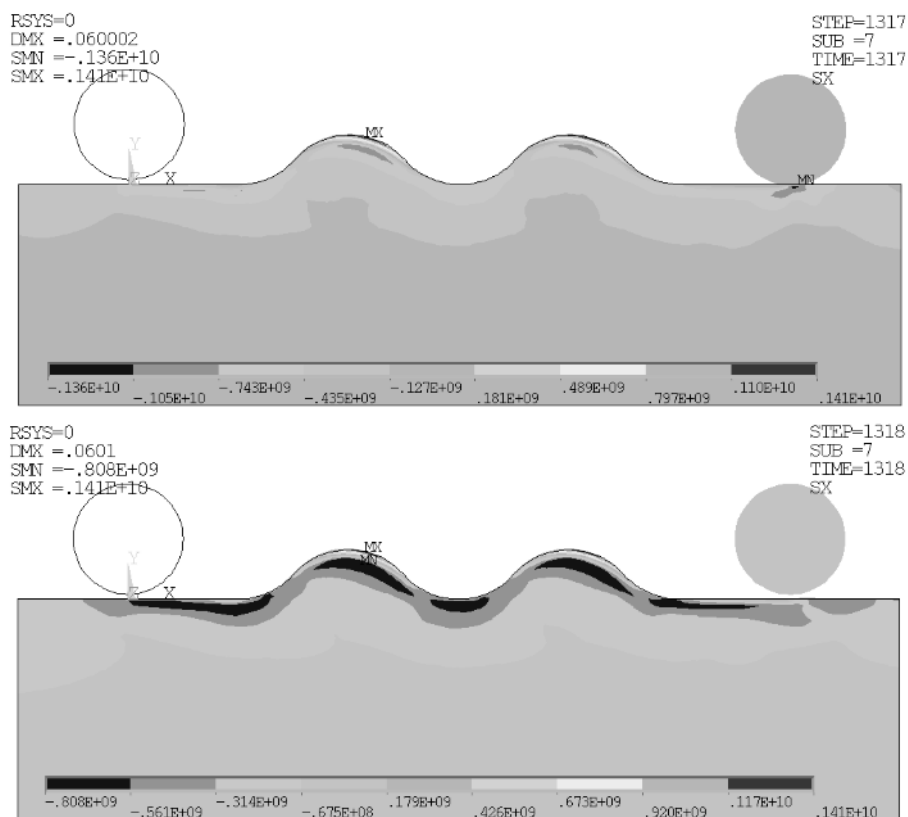


Рисунок 5 – Осевой компонент σ_x при нагрузке и разгрузке при решении 2-й задачи

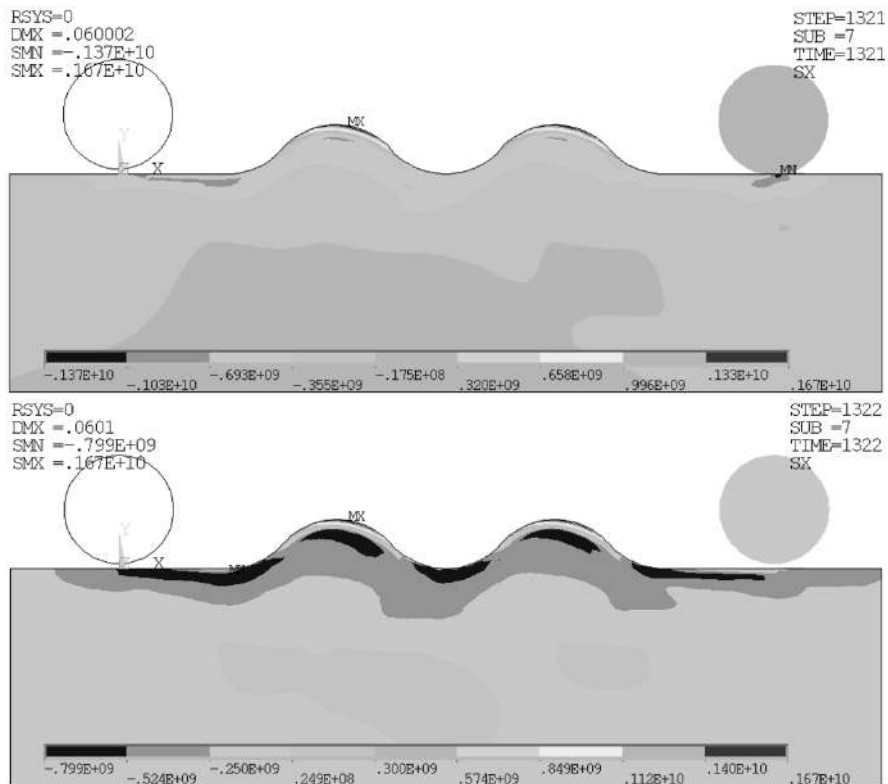


Рисунок 6 – Осевой компонент σ_x при нагрузке и разгрузке при решении 3-ей задачи

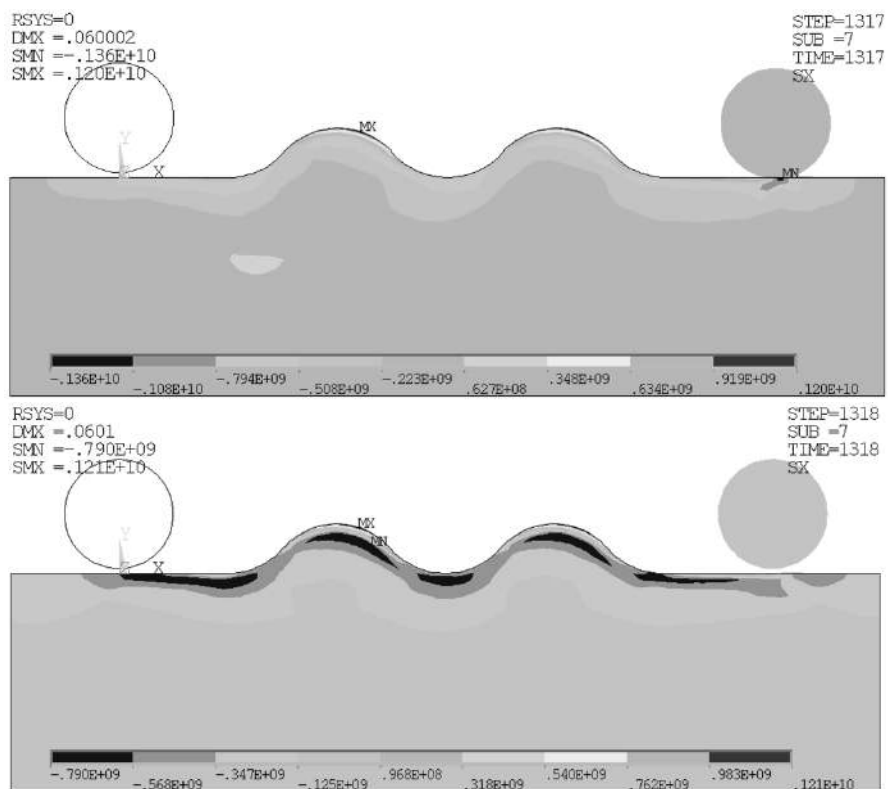


Рисунок 7 – Осевой компонент σ_x при нагрузке и разгрузке при решении 4-ой задачи

Численные предельные значения напряжений циклов нагрузки и разгрузки после решения всех задач сведены в таблицу 1 для удобства сравнения.

Таблица 1 – Численные значения напряжений циклов нагрузки и разгрузки

Номер задачи	Этап задачи	Минимальные напряжения, МПа	Максимальные напряжения, МПа
1	Нагрузка	-1370	945
	Разгрузка	-800	945
2	Нагрузка	-1360	1410
	Разгрузка	-808	1410
3	Нагрузка	-1370	1670
	Разгрузка	-799	1670
4	Нагрузка	-1360	1200
	Разгрузка	-790	1210

Выводы

Установлено, что добиться однородности НДС при использовании описанных корректировок не удалось. При этом максимальные сжимающие напряжения во всех задачах составили -799 ± 9 МПа. Прослеживается закономерность, что чем больше натяг, тем больше растягивающие напряжения, которые образовывались на поверхности на выпуклых участках. Для определения итоговых свойств в ПС необходимо создание модельных представлений о трансформации НДС по мере продвижения частиц через пространство ОД на стадиях нагружения при решении всех задач. Это позволит более точно сравнить результаты распределения осевого компонент σ_x по глубине ПС, что позволит сделать выводы о эффективности применения корректировок в виде изменения натяга. В дальнейшем получение данных станочного эксперимента позволит уточнить начальные и граничные условия решения задач МКЭ-моделирования.

«Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00587»

Список литературы

1. Смелянский, В.М. Информационная поддержка жизненного цикла упрочненных ППД деталей машин. Функциональная модель механики технологического наследования / В.М. Смелянский, В.Ю. Блюменштейн, А.А. Кречетов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. - № 1. – С. 14-23.
2. Блюменштейн, В.Ю. Механика технологического наследования. Описание программы нагружения очага деформации на стадии поверхностного пластического деформирования (ППД) / В.Ю. Блюменштейн // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2001. - № 1. – С. 18-23.
3. Учайкин, С.Е. Влияние стационарности процесса поверхностного пластического деформирования на предел выносливости / С.Е. Учайкин // Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники: сб. ст. участников, международной научно-технической конференции «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники». 424 с. - Брянск: БГТУ, 2020. – С. 227-229.

4. Учайкин, С.Е. МКЭ моделирование обработки ППД сложнопрофильных цилиндрических поверхностей / С.Е. Учайкин // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. ст. научного симпозиума технологов-машиностроителей. 791 с. – г. Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2020. – С. 258-264.

5. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / Чижик С.А., Витязь П.А., Хейфец М.Л., Бородавко В.И., Премент Г.Б., Клименко С.А., Батаев А.А., Блюменштейн В.Ю., Васильев А.С., Колмаков А.Г., Кречетов А.А., Панин А.В., Чугуй Ю.В. // Сер. Технологические комплексы: проектирование, производство, применение. – Минск, 2019.

FEM MODELING OF SURFACE LAYER HARDENING BY ROLLING A WAVY SURFACE WITH A ROLLER

Uchaikin S.E., Graduate student, e-mail: uchaikinserega@mail.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), 650000, Vesennaya street, 28, Kemerovo, Kemerovo region, the Russian Federation

Abstract

A method for processing a curved surface by rolling with a roller has been developed. FEM modeling of processing by rolling a curved surface with the use of tightness corrections has been performed.

Keywords: quality of the surface layer, surface plastic deformation, deformation zone, stress-strain state, stationarity (quasi-stationarity), fillet, FEM modeling.

УДК

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ МЯГКОЙ СХЕМЫ НАГРУЖЕНИЯ

*КРЕЧЕТОВ Андрей Александрович, к.т.н., доцент,
e-mail: krechetovaa@kuzstu.ru*

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Аннотация

Для повышения эффективности цифрового проектирования технологии изготовления изделия важной задачей является совершенствование подходов, используемых для моделирования процессов накопления свойств металла в процессах обработки. Моделирование поверхностного пластического деформирования возможно в плоско-деформированной постановке, как процесса дробной плоской деформации. Однако моделирование процесса в жесткой постановке, по заданному значению действительного натяга, имеет ряд недостатков при моделировании процессов, в которых заданной величиной является сила обработки. В работе предложен подход, позволяющий моделировать накопление свойств в условиях мягкой схемы нагружения, по заданной силе обработки, при этом величина действительного натяга зависит, в том числе, и от упрочнения металла на предшествующих шагах нагружения. Показано, что результаты моделирования с использованием этого подхода соответствуют экспериментальным данным о стационарности очага деформации при поверхностном пластическом деформировании.

Ключевые слова

Поверхностное пластическое деформирование, моделирование технологических процессов, накопление деформации и поврежденности металла.

Введение

В настоящее время в условиях повышения роли цифровых технологий для проектирования конструкции изделия и технологии его изготовления важной задачей является совершенствование подходов к моделированию формирования параметров состояния поверхностного слоя в процессах обработки изделия.

Моделирование поверхностного пластического деформирования цилиндрических поверхностей может быть реализовано как моделирование процесса плоской дробной деформации [1-3]. В этом случае рассматривается напряженно-деформированное состояние в плоскости деформации (осевом сечении детали) при ее повороте относительно оси детали (рис. 1). С каждым оборотом детали инструмент перемещается в осевом направлении на величину подачи. Каждая материальная частица поверхностного слоя детали движется относительно инструмента по спиральной линии, в момент прохождения в очаге деформации вдоль линий тока в этой частице накапливается деформация и поврежденность металла (рис. 2). Моделирование проводится в плоско-деформированной постановке путем последовательного внедрения инструмента на величину v_t , его отвода и последующего смещения на величину подачи (рис. 3).

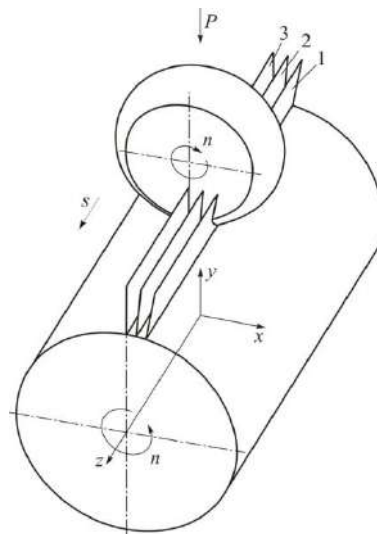


Рисунок 1 – Плоскость деформации в различных положениях при ее повороте относительно оси детали

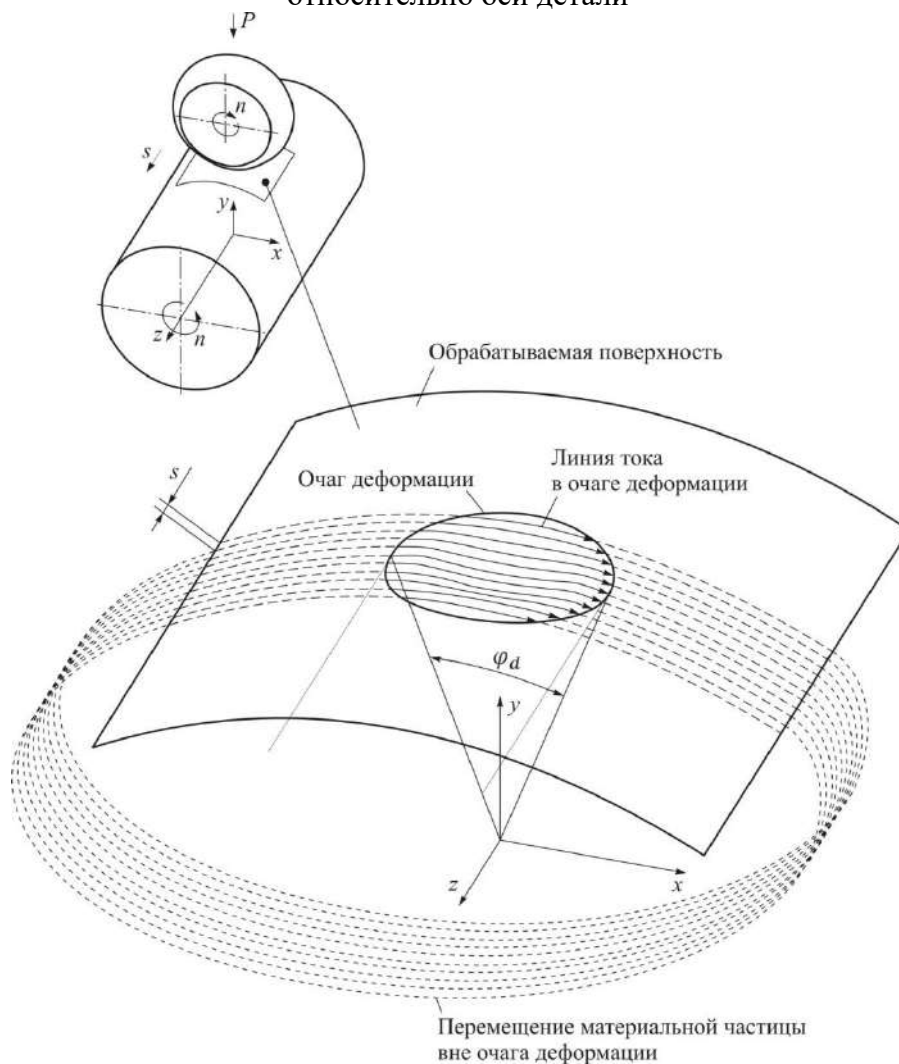


Рисунок 2 – Перемещение материальной частицы относительно инструмента в процессе обработки

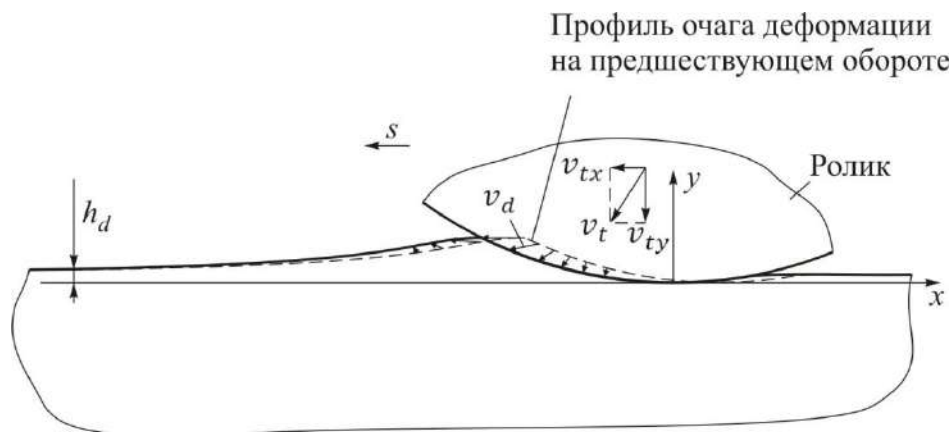


Рисунок 3 – Взаимодействие инструмента и обрабатываемой детали при моделировании поверхностного пластического деформирования

Моделирование контактного взаимодействия инструмента и детали возможно в условиях жесткой и мягкой схемы нагружения. В случае жесткой схемы нагружения, которая ранее использовалась для моделирования поверхностного пластического деформирования, движение инструмента v_{ty} определялось путем задания величины действительного натяга h_d . Достоинством использования такого подхода является вычислительная эффективность моделирования контактного взаимодействия.

Однако для реализации этой схемы требуется знать величину действительного натяга для заданного материала, обрабатываемого по заданным режимам обработки. Также, при моделировании поверхностного пластического деформирования как процесса плоской дробной деформации постоянство натяга в условиях упрочнения материала приводит в ряде случаев к постоянному увеличению напряжений и накапливаемой деформации, что не позволяет обеспечить условие стационарности очага деформации в процессе обработки.

В случае обработки по мягкой схеме нагружения, когда задается сила обработки, величина действительного натяга неизвестна, и определяется, в большинстве случаев по результатам экспериментальных исследований.

Целью данной работы является разработка подхода для моделирования процесса поверхностного пластического деформирования в условиях реализации мягкой схемы нагружения по заданной силе обработки.

Методы

Моделирование процесса пластического поверхностного моделирования проводилось методом конечных элементов с использованием системы ANSYS. В этой системе имеется возможность моделировать контактное взаимодействие, также возможно для контактной поверхности задать силу, с которой эта поверхность действует на другую поверхность.

Однако реализация контактного взаимодействия, где одним из начальных условий является сила, приложенная к одному из тел, требует наличия контакта между двумя поверхностями перед началом расчета. В случае моделирования поверхностного пластического деформирования как процесса плоской дробной деформации определение точки контакта криволинейных поверхностей инструмента и профиля очага деформации после предшествующего шага деформирования является нетривиальной задачей. Имеющиеся программные средства компенсации первоначального зазора между контактирующими поверхностями приводят

к получению некорректного решения при перемещении инструмента относительно обрабатываемой поверхности на величину подачи для реализации следующего шага нагружения.

В связи с этим на языке Mechanical ADPL был реализован алгоритм, позволяющий путем итерационных уточнений определить величину действительно натяга, обеспечивающего заданное значение силы обработки при достигнутом на данном шаге нагружения упрочнении металла:

1. Задается первоначальный диапазон изменения величины действительно натяга, минимальное значение соответствует нулю, максимальное значение соответствует величине действительно натяга, при котором сила реакции опоры в контактной паре заведомо больше заданной силы обработки;

2. Диапазон изменения величины действительно натяга разбивается на два участка, рассчитывается значение силы реакции опоры в контактной паре для среднего значения действительно натяга;

3. Если получившаяся сила реакции опоры в контактной паре для этого среднего значения действительно натяга соответствует с заданной точностью значению силы обработки, значит, это значение действительно натяга является искомым, цикл заканчивается;

4. Если получившаяся сила реакции опоры в контактной паре меньше заданного значения, то средний действительно натяг принимается в качестве минимального значения диапазона изменения действительно натяга, алгоритм повторяется с шага 2.

5. Если получившаяся сила реакции опоры в контактной паре больше заданного значения, то средний действительно натяг принимается в качестве максимального значения диапазона изменения действительно натяга, алгоритм повторяется с шага 2.

Моделирование поверхностного пластического деформирования как процесса плоской дробной деформации требует реализации большого количества шагов нагружения, каждый из которых, в свою очередь, требует подобного итерационного уточнения значения действительно натяга. Для автоматизации подготовки управляющего файла ANSYS разработана специальная программная система, которая позволяет генерировать управляющий файл по заданным режимам обработки и варьировать настройки расчета. Также эта программная система используется для автоматизации последующей обработки полученных результатов.

Результаты и обсуждение

На рис. 4 показано распределение интенсивности пластической деформации после 20 шагов нагружения, на рис. 5 – после 50 шагов нагружения.

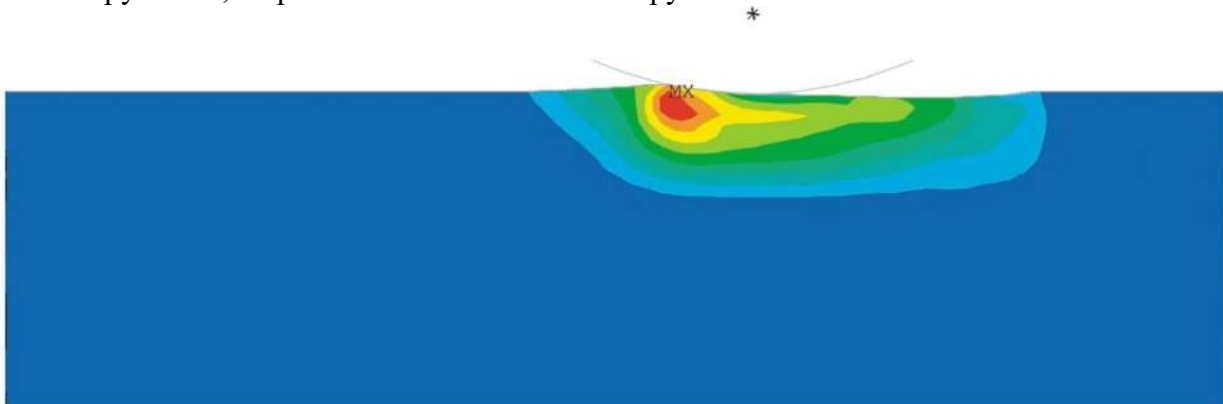


Рисунок 4 – Распределение интенсивности пластической деформации после 20 шагов нагружения

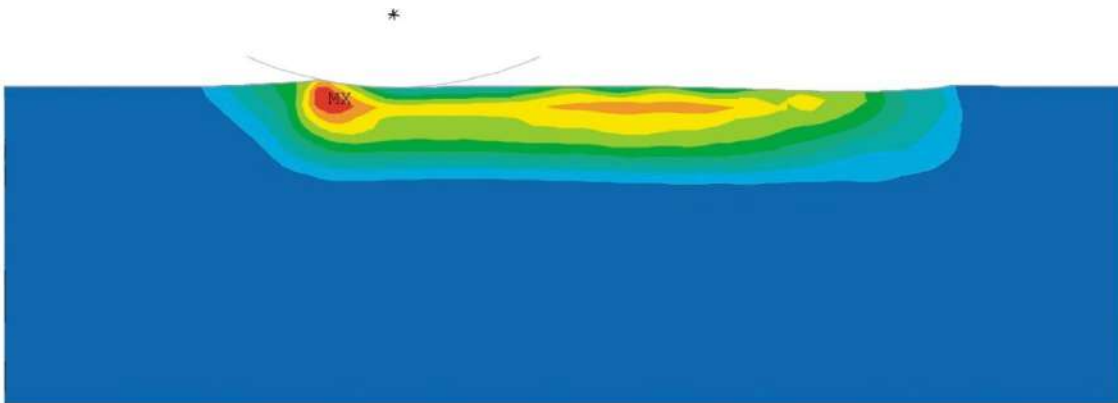


Рисунок 5 – Распределение интенсивности пластической деформации после 50 шагов нагружения

Анализ полученных результатов показывает, что при первоначальном увеличении количества шагов нагружения происходит постепенное увеличение накопленной деформации по глубине поверхностного слоя. Это связано с накоплением деформации при многократном контактом воздействии инструмента и обрабатываемой детали.

Затем глубина упрочненного слоя стабилизируется и после 50 шагов нагружения становится неизменной. Это свидетельствует о стабилизации показателей состояния поверхностного слоя, и в полной мере соответствует экспериментальным результатам, свидетельствующим о стационарности очага деформации после некоторого переходного процесса с начала обработки [1].

Выводы

1. Моделирование поверхностного пластического деформирования в условиях жесткой схемы нагружения, по заданному значению действительного натяга требует наличия экспериментальных зависимостей величины действующего натяга от величины силы обработки.
2. Разработан подход к моделированию поверхностного пластического деформирования в условиях мягкой схемы нагружения, по заданному значению силы обработки, при этом величина действительного натяга определяется итерационным путем из условия соответствия заданного значения силы обработки и силы реакции опоры в контактной паре.
3. Показано, что предложенный подход обеспечивает стационарность параметров состояния поверхностного слоя после обработки, это соответствует экспериментальным результатам, свидетельствующим о стационарности очага деформации после некоторого переходного процесса с начала обработки.

Список литературы

1. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
2. Махалов М.С., Блюменштейн В.Ю. Механика процесса поверхностного пластического деформирования. Модель упрочняемого упругопластического тела // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 6–20. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.4-6-20.

3. Кречетов А.А. Стационарность профиля инструмента при моделировании поверхностного пластического деформирования обкатыванием как процесса плоской дробной деформации // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 54–65. – DOI 10.17212/1994-6309-2021-23.2-54-65.

DEEP ROLLING PROCESS MODELING BY PROCESSING FORCE VALUE

Andrey A. Krechetov, e-mail: krechetovaa@kuzstu.ru

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

Annotation

To raise the efficiency of product production processes digital design, an important task is to improve the approaches used to model the processes of metal properties accumulation in processing processes. Deep rolling modeling is possible in a plane-strain formulation, as a process of flat periodically reproducible deformation. However, modeling a process by value of the tool penetration into processing part has a number of disadvantages when modeling processes in which the processing force is a given value. The paper describes an approach allowing modeling the accumulation of properties under the conditions of a soft loading scheme, according to a given processing force, while the value of the tool penetration into processing part depends, among other things, on the hardening of the metal at the previous loading steps. The modeling results using this approach correspond to experimental data on the deformation area stationarity while deep rolling.

Keywords

Deep rolling, production processes modeling, accumulation of deformations and metal damage.

СЕКЦИЯ 6

SECTION 6

*Подготовка
кадров и
инновационный
менеджмент
машиностроительного
производства*

*Personnel
training and
innovative
management
of mechanical
engineering
industry*

УДК 338.012

ОСОБЕННОСТИ ИННОВАЦИОННОГО ОРГАНИЗАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

*ГАЛИМОВА Анна Николаевна¹, канд. экон. наук, доцент кафедры менеджмента,
e-mail: galimovaanna77@gmail.com
УДАРЦЕВ Александр Доброславович², аспирант,
e-mail: menelion@mail.ru*

¹Новосибирский государственный технический университет, 630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр-т. К. Маркса, 20

²Новосибирский государственный университет экономики и управления, 630099, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Каменская, д. 52

Аннотация

В статье рассмотрены особенности инновационного организационного развития предприятий машиностроительного комплекса России. Определена одна из движущих сил повышения конкурентоспособности отечественных предприятий - формирование и развитие технологической инфраструктуры, без которой невозможно инновационное развитие предприятий. Сформулированы элементы технологической инфраструктуры, среди которых уровень применяемых технологий и оборудования, возможность использования цифровых технологий четвертой промышленной революции Big Data и Internet of Things, IoT, способность оперативно решать кадровые проблемы (подготовка и переподготовка специалистов, владеющих современными инновационными технологиями, как с использованием общей системы образования, так и на основе кооперации с другими предприятиями или собственными возможностями).

Ключевые слова: инновационное организационное развитие, технологии Big Data, Internet of Things, IoT, технологическая инфраструктура предприятия, инновационная экосистема.

Введение

Современный этап развития экономики предусматривает переход ведущих стран к инновационному развитию общества и формированию на этой базе абсолютно новой модели экономики. Соответственно, возрастает значение развития инновационных технологий в аспекте повышения конкурентоспособности экономики страны. В настоящий момент времени на экономику Российской Федерации оказывают влияние санкции со стороны зарубежных стран. Проблему усугубляет дефицит государственного бюджета, вызванный падением цен на энергоносители на мировом рынке. Приведенные аспекты обуславливают необходимость перехода Российской Федерации к инновационной модели экономического развития, которая позволит снизить зависимость от экспорта полезных ископаемых на мировой рынок, будет способствовать решению вопросов импортозамещения.

Почему принципиально важно развивать инновационные технологии на предприятиях именно машиностроительного комплекса? Отвечая на этот вопрос, следует отметить, что машиностроение является одной из наиболее наукоемких отраслей отечественной экономики. Представляет собой совокупность отраслей, производящих машины и осуществляющих

обработку металла для их производства [1]. Степень развития машиностроения является мерой индустриализации мирового экономического хозяйства. При этом предприятия машиностроительного комплекса являются двигателем промышленности и экономики государства.

Вопросам инновационного развития предприятий и управлению производственными системами посвящены труды таких исследователей, как Гончаренко Л.П., Брюханов Ю.М., Кувшинов Г.Г., Кувшинова М.А., Хайруллина М.В. и других.

Целью данной работы является определение особенностей инновационного организационного развития предприятий машиностроительного комплекса России.

Описание теоретических исследований

Рассмотрим динамику инновационного развития экономики России в целом. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели инновационного развития Российской Федерации в период 2018-2020 г.г. [2]

Показатель	2018	2019	2019-2018	2020	2020-2019
Общий объем отгруженных товаров и предоставленных услуг, млн р.	57611057	68982626	+11371569	92253929	+23271303
в том числе инновационные товары, работы, услуги млн р.	4166998	4516276	+349278	4863381	+347105
Удельный вес инновационных товаров, работ, услуг в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг, %	7,2	6,5	-0,7	5,3	-1,2
Затраты на инновационную деятельность, млн руб.	1404985	1472822	+67837	1954133	+481311
Удельный вес затрат на технологические инновации в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг	2,4	2,1	-0,3	2,1	-
Удельный вес организаций, осуществлявших экологические инновации в отчетном году, в общем числе обследованных организаций	1,1	0,8	-0,3	0,6	-0,2

Из представленной таблицы видно, что общий объем отгруженных товаров и предоставленных услуг в 2019 году составил 68982626 млн р., что на 11371569 млн р. больше, по сравнению с 2018 годом. В 2020 году рассматриваемый показатель составил 92253929 млн р., что на 23271303 млн р. больше по сравнению с 2019 годом.

Из общего объема отгруженных товаров и предоставленных услуг объем инновационных товаров, работ, услуг в Российской Федерации в 2019 году составил 4516276 млн р., что на 349278 млн р. больше, по сравнению с объемом 2018 года. В 2020 году рассматриваемый показатель составил 4863381 млн р., что на 347105 млн р. больше по сравнению с уровнем 2019 года. Динамика рассматриваемого показателя представлена на рисунке 1. Несмотря на то, что объем произведенных инновационных товаров, работ, услуг в анализируемом промежутке времени непрерывно возрастал, их удельный вес в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ стабильно снижался. Так в 2019 году удельный вес составил 6,5 %, что на 0,7 % ниже аналогичного показателя 2018 года. В 2020 году рассматриваемый показатель составил 5,3 %, что на 1,2 % меньше по сравнению с уровнем, достигнутым в 2019 году.



Рисунок 1 – Объем произведенных инновационных товаров, работ, услуг в Российской Федерации в период 2018-2020 г.г.

Наметившаяся тенденция не способствует переходу экономики России на инновационный путь развития. Достигнутые в нашей стране темпы развития инновационных процессов не достаточны, чтобы перестроить модель экономического развития Российской Федерации.

Где выход? Выход очевиден и естественен. Его эффективность доказана многократно развитыми странами. Необходимо делать ставку не только на инновационное развитие предприятий, но параллельно создавать условия в целом для развития технологической инфраструктуры освоения новых технологий и продукции. Именно повышение уровня технологической инфраструктуры, в том числе предприятий машиностроительного комплекса, является одной из движущих сил повышения конкурентоспособности промышленности и экономики России (рисунок 2). Правая часть рисунка представляет уровень технологической инфраструктуры развитых стран, в том числе, уровень применяемых технологий и оборудования; левая часть – России. Пики - это наукоемкие инновационные технологии. Если отечественные предприятия машиностроительного комплекса будут делать ставку в своей технической политике только на новейшие технологии, то разрыв между Россией и развитыми странами будет еще более возрастать. Имея более высокую технологическую инфраструктуру и большие финансовые возможности, развитые страны имеют и большие возможности развивать свои новые наукоемкие технологии. Более того, в данной ситуации в пользу развитых стран

играет механизм, который можно назвать туннельным эффектом, т.е. перекупка за бесценок развиваемых в России новейших технологий. Имеет место парадоксальная ситуация, когда вложения в нашу науку фактически оказываются вложениями в развитие новейших наукоемких технологий развитых стран. Осуществляются значительные финансовые вложения в фундаментальные и прикладные исследования в надежде, что хотя бы одна разработка из десяти реализуется и окупит все затраты, но реализуется эта разработка, к сожалению, не в России.

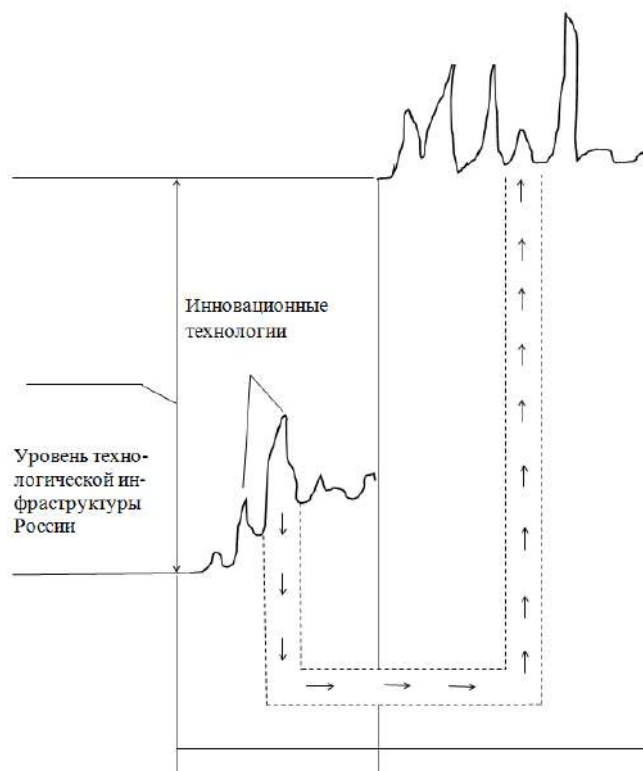


Рисунок 2 – Движущая сила повышения конкурентоспособности промышленности и экономики [3, с. 74]

Результаты и обсуждение

Конкурировать российским предприятиям машиностроительного комплекса с аналогичными предприятиями развитых стран в области инновационных технологий будет затруднительно до тех пор, пока не удастся повысить уровень нашей технологической инфраструктуры до уровня, соизмеримого с уровнем развитых стран. Процессы инновационного организационного развития предприятий и формирования и развития технологической инфраструктуры должны идти параллельно и дополнять друг друга.

Обобщенное понятие технологической инфраструктуры (или технологической культуры) невозможно отнести только к одному предприятию. Элементами технологической инфраструктуры являются:

- уровень применяемых технологий и оборудования, возможность научного сопровождения инновационных проектов,
- общий уровень освоения цифровых технологий, уровень стандартизации конструкторской документации и сертификации продукции,

- наличие на предприятии необходимых научных и конструкторских подразделений и специалистов,
- способность оперативно решать кадровые проблемы (подготовка и переподготовка специалистов, владеющих современными инновационными технологиями, как с использованием общей системы образования, так и на основе кооперации с другими предприятиями или собственными возможностями),
- возможность быстрой кооперации с другими предприятиями при решении технологических проблем и освоении новых технологий и продукции,
- наличие развитой сети консалтинговых услуг,
- наличие действующей нормативно-законодательной базы, стимулирующей вложение капитала в производство и в инновационную сферу.

Элементы технологической инфраструктуры становятся частью инновационной экосистемы.

От вопроса необходимости развития технологической инфраструктуры перейдем к вопросу внедрения инноваций в машиностроительном комплексе. Необходимо отметить главный тренд – переход к четвертой промышленной революции. Для машиностроительного комплекса данный факт означает переход к внедрению киберфизических цифровых систем в различных отраслях производства. Сопряженные с этим изменения охватят самые разные стороны машиностроительной промышленности и человеческой жизни в целом. Внедряемые в машиностроении цифровые технологии четвертой промышленной революции потребуют преобразования действующего производственного технологического уклада, что непосредственно изменит существующий рынок труда, значительно снизив потребность в живой рабочей силе, а также затронут жизненную среду человека и многие связанные с ней области деятельности [4, 5].

В частности, для предприятий машиностроительного комплекса применение одной из передовых технологий четвертой промышленной революции Big Data является перспективным направлением возможного повышения конкурентоспособности. По прогнозам отдельных исследователей [6-8] использование данной технологии позволит повысить уровень контроля за большим количеством производственных и организационных параметров. Систематизировать их и далее сформировать необходимые управленческие решения для развития конкурентоспособности предприятия. При квалифицированном подходе Big Data позволит сделать производственный процесс в машиностроительном комплексе более гибким и адаптированным к постоянно меняющимся условиям внешней среды. Соответственно, данная технология изменит и модель организационного развития предприятия. Отдельные элементы организационной структуры управления предприятием потеряют свою значимость и необходимость. Изменяются требования к специалистам предприятий. Выпускники вузов, успешно освоившие наряду с профессиональными компетенциями и цифровые компетенции, будут наиболее востребованы работодателями.

Еще одной актуальной разработкой для предприятий машиностроительного комплекса является технология Internet of Things, IoT. С помощью данной технологии можно решать вопросы повышения производительности труда и снижения издержек [9, 10]. Теперь управленческие решения, принимаемые менеджерами разного уровня, отходят на второй план, уступая место современным технологиям, которые измеряют производственный процесс в машиностроительном комплексе, анализируют его и дают рекомендации по повышению эффективности.

Можно сделать вывод, что на смену управленческому таланту приходят инновационные технологии, способные в кратчайшие сроки провести анализ большого объема данных, который просто не под силу человеческому интеллекту. За счет применения данных разработок снижается потребность в управленческих единицах среднего звена, так как их функции выполняют современные технологии. Благодаря данному процессу значительно снижается вероятность ошибки, что положительно влияет на конечный результат.

Внедрение указанных выше технологий особо актуально для предприятий машиностроительного комплекса. Производство в рассматриваемом секторе экономики характеризуется значительным объемом параметров, которые возможно измерить и проанализировать с помощью технологий Big Data и Internet of Things, IoT. Соответственно, в ближайшей перспективе на предприятиях машиностроительного комплекса будут востребованы специалисты, способные работать в рамках использования передовых инновационных разработок. Вся организационная структура предприятия будет скорректирована с учетом новых технологий, которые будут, в том числе, определять, способы и виды организационных взаимодействий производственного коллектива.

Выводы

За счет внедрения инновационных технологий, таких как Big Data и Internet of Things, IoT, производственный процесс становится более прогнозируемым и контролируемым, что в свою очередь позволяет снизить издержки и повысить эффективность работы. Особенностью инновационного развития предприятий машиностроительного комплекса России является тот факт, что соперничество с развитыми странами будет возможным при условии не только внедрения инноваций, но и развития технологической инфраструктуры в целом. При этом меняется модель организационного развития предприятия: корректируется организационная структура управления за счет упразднения отдельных должностей, подразделений; акцент в управлении смещается в сторону развития процессов самоорганизации, активизации креативного потенциала в координатах «личность-подразделение-предприятие»; изменяются способы взаимодействия сотрудников.

Для отечественного машиностроительного комплекса данный этап является шансом для достижения высокого уровня конкурентоспособности, который был утерян в период 90-х годов. Те предприятия, руководство которых осознает значимость и прикладывает усилия для повышения уровня технологической инфраструктуры, внедрения передовых инноваций в производственный процесс, будут иметь шанс конкурировать с мировыми лидерами экономического развития. Если в настоящий момент времени предприятия машиностроительного комплекса России не перестроятся на инновационный путь развития, то в ближайшем будущем отставание достигнет критического уровня.

Список литературы

1. Абрашкин М.С. Наукоемкость и инновационное развитие предприятий машиностроения// Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2018. № 4. С. 107-115. DOI: 10.24143/2073-5537-2018-4-107-115
2. Федеральная служба Государственной статистики Российской Федерации [Электронный ресурс] <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения 20.06.21)
3. Кувшинова М.А., Галимова А.Н. Самоорганизация в развитии инновационного предпринимательства: Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 194 с.

4. Рябов А.Н. Консолидация научного знания в технологии машиностроения инструментами четвертой промышленной революции// Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2019. № 2 (49). С. 61-65
5. Плотников А.А. Инновации в машиностроении // Economics. 2019. №5 (43). С. 41-48.
6. Плакиткина Л.С., Плакиткин Ю.А., Дьяченко К.И. Оценка производственного потенциала отечественных машиностроительных предприятий для реализации программы импортозамещения в угольной отрасли // Уголь. 2021. №1 (1138). С.34-42. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-1-34-42
7. Зеньков И.В., Ченцов С.В., Морин А.С., Логинова Е.В., Касьянова Е.Н., Анищенко Ю.А., Кондрашов П.М., Кирюшина Е.В., Вокин В.Н., Веретенова Т.А. Информационное обеспечение инновационного развития машиностроительного комплекса по ремонту горно-транспортного оборудования в условиях рыночной экономики // Уголь. 2020. №1 (1126) С. 41-45. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-1-41-45
8. Колташов С.Н. Завод инновационного машиностроения – проект, направленный на импортозамещение // Уголь. 2019. №8 (1121). С. 98-99
9. Чарыкова О.Г., Маркова Е.С. Региональная кластеризация в цифровой экономике // Экономика региона. 2019. №2. С. 409-419. DOI: 10.17059/2019-2-8
10. Орехова С.В., Кислицын Е.В. Малый бизнес и структурные сдвиги в промышленности // Terra Economicus. 2019. №4. С. 129-147. DOI: 10.23683/2073-6606-2019-17-4-129-147.

FEATURES OF INNOVATIVE ORGANIZATIONAL DEVELOPMENT OF ENTERPRISES OF THE MACHINE-BUILDING COMPLEX

Galimova A.N.¹, Ph.D. in Economics, Associate Professor of the Department of Management, e-mail: galimovaanna77@gmail.com

Udartsev A.D.², postgraduate student, e-mail: menelion@mail.ru

¹Novosibirsk State Technical University, 20 ave. K. Marx, Novosibirsk, 630073, Russian Federation,

²Novosibirsk State University of Economics and Management, 52 Kamenskaya str., Novosibirsk, 630099, Russian Federation

Annotation

The article considers the features of innovative organizational development of enterprises of the machine-building complex in Russia. One of the driving forces of increasing the competitiveness of domestic enterprises is the formation and development of technological infrastructure, without which innovative development of enterprises is impossible. The elements of the technological infrastructure are formulated, including the level of used technologies and equipment, the possibility to use digital technologies of the fourth industrial revolution, Big Data and Internet of Things, IoT, the ability to quickly solve personnel problems (training and retraining of specialists who possess modern innovative technologies, both using the general education system, and on the basis of cooperation with other enterprises or their own capabilities).

Keywords: innovative organizational development, Big Data technologies, Internet of Things, IoT, technological infrastructure of the enterprise, innovation ecosystem.

УДК

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДА НА ФГОС ВО 3++ ДЛЯ БАКАЛАВРОВ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*ОВЧАРЕНКО Александр Григорьевич, доктор техн. наук, профессор,
e-mail: shura@bti.secna.ru*

*ФИРСОВ Александр Максимович, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: tmk@bti.secna.ru*

*РОМАШЕВ Александр Николаевич, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: tmk@bti.secna.ru*

*СМИРНОВ Виталий Васильевич, кандидат техн. наук, доцент,
e-mail: tmk@bti.secna.ru*

Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, 659305, Россия, г. Бийск, ул. Трофимова, 27

Аннотация

Рассмотрены проблемы при переходе на обучение со стандартов ФГОС ВО 3+ на стандарты ФГОС ВО 3++ в Бийском технологическом институте (филиале) Алтайского государственного технического университета. Проведен анализ содержания программы бакалавриата по направлению подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». Отмечается важная роль примерной основной образовательной программы при формировании программ бакалавриата. Анализ сопряжения ФГОС ВО 3++ с профессиональными стандартами выявил недостатки при формировании образовательных программ. Отмечены определенные сложности при формировании практико-ориентированных фондов оценочных средств. Предложены пути повышения уровня качества учебно-методических материалов по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Ключевые слова: высшее образование, федеральные государственные образовательные стандарты, машиностроение, рабочие программы дисциплин, фонды оценочных средств.

Введение

Современный период развития машиностроения характеризуется усилением роли информационных технологий и превращением их из вспомогательного средства в равноправные производственные технологии.

Сегодня информатизация является одной из основных машиностроительных технологий наряду с такими перспективными направлениями как нанотехнологии, когда обеспечивается сверхвысокая точность изделий, высокоэнергетические технологии и др. Эти направления имеют важнейшее значение в развитии машиностроения 21-го века, но информационные технологии интенсифицирует каждое из этих направлений.

В настоящее время по темпам внедрения инноваций российское машиностроение отстает от развитых стран, но по мнению аналитиков к 2030 году машиностроительная отрасль России будет повсеместно и регулярно внедрять инновации и цифровые технологии, что значительно улучшит эффективность и конкурентоспособность предприятий [1].

Важнейшей задачей технических университетов страны является создание кадров для инженерно-технического обеспечения интеллектуальных производств 21-го века. Сегодня к инструментам будущего относят машинное обучение, анализ больших баз данных, 3D-печать, виртуальная реальность, роботы и другие инструменты, характерные для Индустрии 4.0. Своевременное внедрение таких инструментов сможет помочь российским машиностроительным компаниям быть конкурентоспособными и занять достойное место среди мировых лидеров в области машиностроения. Сегодня Правительство России играет ключевую роль в поддержке инноваций в различных отраслях машиностроения, включающую целевые гранты на НИОКР, политику импортозамещения, помощь при создании инновационных кластеров и др.[2,3].

Исследования, результаты, обсуждения

В настоящий период вузы России переходят на обучение со стандартов ФГОС ВО 3+ на стандарты ФГОС ВО 3++. В свое время стандарты ФГОС ВО 3+ предназначались для приведения образовательных программ к нормам, установленным новым ФЗ «Об образовании в РФ» (№ 273-ФЗ от 29 дек 2012 г.). Их реализация связана с началом внедрения профессиональных стандартов. В образовательных стандартах ФГОС ВО 3++ профессиональные стандарты уже являются приложением, что позволяет не переутверждать ФГОС при появлении новых профессиональных стандартов. При этом исходят из задач профессиональной деятельности, профессиональных компетенций, необходимых для выполнения профессиональных задач, и далее в конкретных дисциплинах компетенции раскрывают через индикаторы.

При переходе на обучение по новым образовательным стандартам ФГОС ВО 3++ в каждом вузе возникают свои особенности. На примере направления подготовки бакалавров 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» авторы статьи провели анализ возникающих трудностей и рассмотрели возможные пути их преодоления.

В Бийском технологическом институте (филиале) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова при переходе на ФГОС ВО 3++ направления подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» с профилем «Технология машиностроения» выявились свои особенности. С одной стороны Бийский технологический институт, являясь филиалом технического университета, взял за основу основную профессиональную образовательную программу (программу бакалавриата) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, с другой стороны, с учетом потребностей города Бийска, в котором расположен филиал, необходима подготовка специалистов для соответствующих отраслей и профессиональных стандартов.

При анализе программы бакалавриата было обращено внимание, что если в ФГОС ВО 3+ профессиональные компетенции были заданы, то в ФГОС ВО 3++ они рекомендуются в примерной основной образовательной программе или определяются самостоятельно образовательной организацией при отсутствии. Направленность (профиль) программы определяет вуз. Образовательная организация самостоятельно определяет соотношение базовой и вариативной частей программы бакалавриата с учетом рекомендаций примерной основной образовательной программы.

Ясно, что с введением ФГОС ВО 3++ значительную роль играют примерные основные образовательные программы (ПООП). Поскольку ПООП пока не утверждены ни по одному направлению подготовки, каждой образовательной организации приходится самостоя-

тельно проектировать собственные основные профессиональные образовательные программы (ОПОП) и для каждой из них анализировать все утверждённые на момент её создания профессиональные стандарты.

Требования к результатам освоения программы складываются из универсальных компетенций и общепрофессиональных компетенций, определяемых ФГОС ВО 3++, а также профессиональных компетенций которые определяются ПООП (при наличии) или только ОПОП организации. При этом организацией формулируются индикаторы достижения рекомендуемых и самостоятельно установленных профессиональных компетенций.

При отсутствии ПООП каждый вуз формирует свои профессиональные компетенции, что приведет к разрушению единого отечественного образовательного пространства и единых форматов подготовки выпускников в рамках одного направления подготовки.

Интересным вопросом является сопряжение ФГОС ВО и ПООП с профессиональными стандартами. Считается, что разработка профессиональных стандартов является ключевым фактором, который является определяющим при взаимодействии рынка труда и системы образования. Поэтому не случайно Правительством Российской Федерации приняло решение о новой актуализации образовательных стандартов третьего поколения, которые задают федеральную норму качества образования, позволяющую выпускникам успешно работать на рынке труда с учётом его изменчивости. При этом по своей сути профессиональные стандарты являются очень конкретным и детальным описанием трудовых функций сегодняшней профессиональной деятельности и необходимых для этого квалификаций.

Необходимо отметить, что профессиональные стандарты (ПС) имеют определённый жизненный цикл, который значительно короче жизненного цикла ФГОС ВО. Стандарты высшего образования ориентированы на будущее, примерно на 10–15 лет вперёд, а наиболее вероятным сроком актуализации ПС называют 3–5 лет. Последнее определяется появлением новых технологий, которые находят отражение в профессиональных стандартах, также постоянным улучшением качества самих ПС. Следовательно, жёсткая связь ФГОС ВО с требованиями профессиональных стандартов может привести к тому, что система образования окажется нацеленной на формирование компетенций, которые к выпуску будут уже неактуальными [4].

При этом в большинство ПС не учитываются трудовые действия, необходимые знания и умения, связанные с инновационной и научно-исследовательской деятельностью. Таким образом, по своей сути, ФГОС ВО 3++ представляет стандарт прикладного бакалавриата. Это существенно уменьшает области и задачи профессиональной и образовательной деятельности обучающихся. Поэтому каждый вуз вынужден самостоятельно определять те дисциплины, которые будут способствовать развитию инноваций в технике и экономике, формированию способностей в проведении научных исследований, умению научно обосновывать эффективные методы и технологии.

В ближайшее время значительное развитие получит теория управления технологическими процессами на основе использования информационных моделей, включающие человеческие знания. Поэтому основой автоматизированных систем будут не алгоритмы и программные продукты, а знания специалистов, представленные в виде моделей. Таким образом, будет создаваться интеллектуальный потенциал предприятия и храниться на электронных носителях. При этом важнейшим фактором будет являться культура взаимоотношений потребителей и производителя, а также корпоративная культура, которая должна способствовать инновационному мышлению сотрудников. Цифровизация машиностроения позволит предприятиям увеличить долю конкурентоспособной продукции. Важную роль будет играть высокоавтоматизированная CAD-CAM-система для решения задач машиностроения.

В учебном плане, разработанном техническим университетом, вышесказанное нашло отражение в базовых дисциплинах (Системный анализ и принятие решений, САД системы в машиностроении, Аддитивные технологии, Автоматизация конструкторского и технологического проектирования, Автоматизация производственных процессов в машиностроении, Программирование для станков с ЧПУ). С учетом перспектив развития города Бийска в элективный и факультативный блоки программы бакалавриата выпускающей кафедрой филиала были внесены актуальные дисциплины, такие как: Инструментальные системы автоматизированных производств, Технологические основы гибких автоматизированных производств, Менеджмент качества в машиностроении, Охрана труда в машиностроении.

Определенные трудности возникают у разработчиков рабочих программ дисциплин при формировании фондов оценочных средств (ФОС). В настоящее время ведется работа над созданием ФОС в соответствии с требованиями индикаторов достижения компетенций, которые учитывают практико-ориентированный подход к образованию. В результате этой работы возможно создание банка интересных компетентностных ФОС с применением различных образовательных технологий (кейс-методов, деловых игр и т.п.) Это заставило разработчиков по-новому взглянуть на преподаваемый предмет и проявить значительные творческие способности.

Очевидно, что практическое внедрение актуализированных образовательных программ, принципиально отличающихся от всех предыдущих, поэтому требуется дополнительное обучение педагогического корпуса. При реализации практико-ориентированных образовательных программ высшего образования важное внимание необходимо уделить вопросам организационно-методической работы, включающей улучшение методической работы преподавателей, организацию обмена методическим опытом на уровне преподавателей кафедры, кафедр вуза, факультетов, других вузов [6].

Наиболее важным моментом являются требования к применяемым механизмам оценки качества образовательных программ бакалавриата (рис.1)



Рисунок 1 – Механизмы оценки качества образовательных программ бакалавриата

Если внешняя оценка качества образовательных программ в первую очередь связана с государственной аккредитацией, которая проводится один раз в 6 лет, то внутренняя оценка

должна проводиться постоянно с целью поддержания достигнутого уровня качества образовательных услуг и их улучшения. Важную роль в этом вопросе должны иметь студенты, преподаватели и работодатели. Развитие системы внутренней оценки качества образовательных программ бакалавриата позволит постоянно совершенствовать механизм мониторинга компетенций обучающихся.

Выводы

1. С учетом подготовки бакалавров для отраслей конкретного города (региона) разработчики по согласованию с работодателями должны корректировать вариативную часть образовательной программы, РПД дисциплин и программы практик.
2. В связи с переходом на практико-ориентированную подготовку бакалавров-машиностроителей необходимо обучение преподавателей в области учебно-методической работы с целью совершенствования методической работы, особенно при создании ФОС в рабочих программах.
3. С учетом мировых тенденций развития машиностроения в ОПОП необходимо отражать инновационные и информационные (цифровые) технологии, позволяющие молодым специалистам активно использовать современные средства проектирования и производства, а также совершенствовать технологические процессы.
4. Необходимо развитие системы внутренней оценки качества образовательных программ для совершенствования механизма мониторинга компетенций обучающихся.

Список литературы

1. Аналитики McKinsey. <https://trends.rbc.ru/trends/innovation/5d652ed39a794752820edc3f>
2. Стратегия развития транспортного машиностроения Российской Федерации на период до 2030 года. - Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/klnxiLOfYHPRsEe6cD9NsI0KM32LMacz.pdf>
3. Стратегия развития машиностроения для пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2030 года. – Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/KNMcvWfv5ZveFs1FtrfxqAyjLED28JsG.pdf>
4. Елина Е.Г., Ковтун Е.Н., Родионова С.Е. Российское высшее образование в условиях профессиональной стандартизации: опыт, вызовы, риски. // Высшее образование в России. - №6. -2019. –С. 9-27.
5. ФГОС ВО 3++ для бакалавров направления 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». – Режим доступа: http://fgosvo.ru/uploadfiles/FGOS%20VO%203++/Bak/150305_B_3_14092020.pdf
6. Митрофанова М.Ю., Поверинов И.Е., Григорьев А.В. К вопросу о разработке оценочных материалов при реализации образовательных программ в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами высшего образования третьего поколения (ФГОС ВО 3++) //Современные проблемы науки и образования. – 2021. – № 2.- Режим доступа: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=30657>.

FEATURES OF THE TRANSITION TO THE FSES IN 3++ FOR BACHELORS IN MECHANICAL ENGINEERING

Ovcharenko A.G., Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: shura@bti.secna.ru

Firsov A.M., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: tmk@bti.secna.ru

Romashev A.N., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: tmk@bti.secna.ru

Smirnov V.V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: tmk@bti.secna.ru

Biysk Technological Institute (branch) of the I. I. Polzunov Altai State Technical University, 27
Trofimova str., Biysk, 659305, Russia

Annotation

The problems of the transition to training from the standards of the Federal State Educational Standard VO 3+ to the standards of the Federal State Educational Standard VO 3++ at the Biysk Institute of Technology (branch) are considered Altai State Technical University. The analysis of the content of the bachelor's degree program in the direction of training 15.03.05 "Design and technological support of machine-building industries" is carried out. The important role of the approximate basic educational program in the formation of bachelor's degree programs is noted. The analysis of the interface of the FSES IN 3++ with professional standards revealed shortcomings in the formation of educational programs. Certain difficulties are noted in the formation of practice-oriented evaluation funds. The ways of improving the quality of educational and methodological materials in the direction of training "Design and technological support of machine-building industries" are proposed.

Keywords: higher education, federal state educational standards, mechanical engineering, work programs of disciplines, assessment funds.

УДК 334.021

ЭВОЛЮЦИЯ КЛАССИФИКАЦИЙ ЦИФРОВЫХ БИЗНЕС-МОДЕЛЕЙ В РАМКАХ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

*САПОЖНИКОВ Павел Алексеевич, студент магистратуры,
e-mail: paulflse29@gmail.com*

*КОЛОЖВАРИ Юлия Борисовна, канд. экон. наук, доцент,
e-mail: ukolo@inbox.ru*

Новосибирский Государственный Университет Экономики и Управления (НГУЭУ),
630099, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Каменская, 52

Аннотация

Целью исследования является рассмотрение и анализ эволюции основных классификаций цифровых бизнес-моделей компаний в условиях развития цифровой экономики. Анализ предложенных классификаций проводился при помощи методов абстрагирования, анализа, синтеза и систематизации. В результате работы были собраны, проанализированы и описаны основные классификации цифровых бизнес-моделей, а также сделаны выводы и предложены рекомендации по применению данных моделей в условиях развития современного бизнеса.

Ключевые слова: бизнес-модель, цифровая экономика, digital-среда, цифровая среда, классификация

Введение

Вопрос изучения бизнес-моделей цифровых компаний в условиях развития цифровой экономики является особенно актуальным на сегодняшний день: все больше и больше компаний уходят в цифровую среду в поисках новых каналов взаимодействия с потребителями, а также формирования устойчивого конкурентоспособного преимущества в виде уникальной модели ведения бизнеса. В данной работе рассматриваются ряд классификаций бизнес-моделей, предложенных зарубежными и отечественными исследователями, в разрезе цифрового характера исследуемого явления.

По данным журнала «Forbes» на декабрь 2019 года, 60% зарубежных компаний, которые перенесли цифровую трансформацию, в конечном итоге адаптировали совершенно новую бизнес-модель. При этом 89% компаний уже адаптировали традиционные модели ведения бизнеса к цифровым, либо намереваются это осуществить. При этом в России цифры оказываются меньше, однако тенденция, в целом, сохраняется аналогичной: компании вынуждены адаптировать традиционные модели ведения бизнеса для сохранения позиций на рынке [1].

Описание теоретических исследований

По мнению Б. М. Гарифуллина и В. В. Зябрикова, развитие бизнес-моделей ассоциируется с появлением платформенных моделей ведения бизнеса как замену традиционным. Так, платформенные бизнес-модели создают ценность для клиентов как при помощи использования цифровых технологий, что обеспечивает взаимодействие всех участников бизнес-модели и равный доступ к информации, а традиционные – при помощи дополнительного звена в цепочке создания ценности. При этом платформенные модели как исходная точка в

развитии частных видов моделей ведения бизнеса являются более быстрыми по скорости взаимодействия между участниками модели, однако требуют достаточно крупных инвестиций на старте развития самой платформы, на которой и происходит это взаимодействие [2].

Наиболее ранней попыткой создания более частной классификации бизнес-моделей с позиции цифровизации является вариант, предложенный П. Тиммерсом. Так, ученый предлагает разделять бизнес-модели непосредственно по отношению к цифровой деятельности: интернет-магазин (e-shop), интернет-снабжение (e-procurement), интернет-аукцион (e-auction), интернет-торговый центр (e-mall), косвенный рынок или же третья сторона (third party marketplace), виртуальная система (virtual community), оказание услуг цепочки создания ценности (value chain service provider), интегратор цепочки создания стоимости (value chain integrator), платформа сотрудничества (collaboration platform), информационное посредничество (information brokerage), служба качества (trust services). Необходимо отметить, что некоторые виды бизнес-моделей, предлагаемые в рамках данной классификации, уже видоизменили свою форму в силу достаточно базового характера классификации, а также развития цифровизации и бизнеса в целом [5], [6].

В. Д. Маркова предлагает более расширенную классификацию платформенных бизнес-моделей: так, исследователь выделяет внутренние платформы на основе цифрового двойника, платформы-интеграторы и многосторонние платформы. Так, первый вид предлагаемых бизнес-моделей наиболее актуален в производственных сферах и связан с созданием цифрового двойника физического продукта, реализуемого какой-либо компанией, второй – как в сфере услуг, так и производства, объединяя участников моделей со стороны поставщика продукта или услуга и конечного потребителя, а третий – агрегатором какого-либо бизнеса, предлагающего комплексный набор продуктов и услуг, которые зачастую могут быть и не связаны друг с другом [4].

П. Вайль предлагает более обобщенную классификацию бизнес-моделей: автор выделяет 8 атомарных, или же базовых, бизнес-моделей, которые могут быть изменены, либо же перестроены в совершенно новую модель бизнеса при их комбинировании [5]:

- контент-провайдер (content provider) – компания предоставляет продукт или услугу в виде контента через посредников.
- прямая работа с клиентом (direct consumer) – компания предоставляет продукт или услугу напрямую клиенту без каких-либо посредников.
- поставщик полного набора услуг (full service provider) – компания предоставляет полный пакет услуг в рамках одной сферы без каких-либо посредников, при этом пытается удержать клиента во всем цикле решаемой проблемы.
- посредник (intermediary) – компания сводит вместе покупателя и продавца, являясь при этом посредником в ходе передаваемой информации, продукта или же оказания услуги.
- общая инфраструктура (shared infrastructure) – компания собирает конкурентов какой-либо отрасли или сферы деятельности в одном месте, образуя при этом совместную сеть.
- интегратор ценностной сети (value net integrator) – компания координирует действия в ценностной сети посредством сбора и распространения информации.
- виртуальное сообщество (virtual community) – компания создает единое сообщество для пользователей со схожими интересами, позволяя при этом осуществлять взаимодействие между ними и реализовать продукт или услугу.
- целое предприятие (whole of enterprise) – данная бизнес-модель представляет собой нечто похожее на центр взаимодействия между всеми подразделениями компании: так,

если одному подразделению необходима информация другого, то оно без труда сможет получить ее в несколько действий.

Отметим, что данная классификация удобна тем, что является достаточно гибкой: так, рассмотренные нами выше виды бизнес-моделей можно видоизменять или объединять для получения совершенных новых моделей бизнеса. Кроме того, мы считаем, что данная классификация может взаимодействовать с классификациями, предложенными другими авторами: например, модель «посредник» («intermediary») и «интернет-торговый центр» («e-mall»), предложенная в рамках предыдущей классификации, образуют такую модель бизнеса как «маркетплейс» («marketplace»), так как позволяет сделать единый электронный торговый центр, где собственник бизнеса выступает в качестве посредника для функционирования отдельно взятых магазинов (например, сервис «OZON»).

Б. Талин предлагает классификацию бизнес-моделей в соответствии с получаемым доходом. Так, исследователь выделяет следующие модели: свободная, фриميةвая, по запросу, электронной коммерции, рыночной площадки, экосистемы, совместного использования, опыта, подписки, открытым исходным кодом, скрытая [7].

При этом важной точкой зрения в вопросе эволюции к классификации видов бизнес-моделей является сегодняшняя точка зрения, изложенная учеными бизнес-школы университета Санкт-Галлена. Исследователи считают, что большинство бизнес-моделей компании являются синтезом уже существующих. Так, фирмам необходимо изучать опыт ведущих компаний, определять положительные и проблемные места в целях комбинирования лучших практик для достижения поставленных результатов. При этом авторы предлагают 55 базовых бизнес-моделей таких, как, например, модели «айкидо», «бартера», «бритвы и лезвия», «дирижера», «долевой собственности», «интегратора», «краудсорсинга», «магазина в магазине», «массовую», «открытого бизнеса», «оцифровывания» и так далее [3]. При этом точка зрения авторов, в целом, схожа с подходом П. Вайля, так как бизнес-модель современной компании рассматривается ими с точки зрения синтеза уже существующих базовых моделей.

Результаты и обсуждение

Таким образом, исходя из проведенного нами исследования ряда классификаций цифровых бизнес-моделей, можно сделать вывод о том, что основными тенденциями в формировании цифровой бизнес-модели современной компании является постоянный мониторинг и определение сильных сторон бизнес-моделей ведущих компаний рынка в целях создания собственной уникальной модели ведения бизнеса на базе уже существующих. Современные постоянно меняющиеся условия внешней среды уже не позволяют просто использовать готовые бизнес-модели: так, компаниям необходимо быть гибкими в ведении бизнеса, что и достигается при комплексном комбинировании существующих бизнес-моделей в целях создания уникальной модели ведения для формирования устойчивого конкурентоспособного преимущества на рынке.

Выводы

В ходе работы нами были проанализированы ряд классификаций цифровых бизнес-моделей компаний. Так, в качестве основного вывода проведенного исследования нами было установлено, что современные реалии развития бизнеса требуют адаптивного подхода: цифровым компаниям не стоит выбирать и придерживаться какой-либо единой готовой бизнес-модели на долгие годы, так как внешняя среда функционирования бизнеса становится все более изменчивой. Таким образом, компаниям необходимо анализировать тенденции изменения условий внешней среды, а также отвечать на них посредством изменения и синтеза различных бизнес-моделей в целях создания уникальной модели бизнеса, которая окажется наиболее эффективной для данной компании.

Список литературы

1. 100 Stats On Digital Transformation And Customer Experience // Forbes. URL: <https://www.forbes.com/sites/blakemorgan/2019/12/16/100-stats-on-digital-transformation-and-customer-experience/?sh=312759703bf3> (дата обращения: 10.05.2021)
2. Гарифуллин Б.М., Зябриков В.В. Виды бизнес-моделей компаний в цифровой экономике // Креативная экономика. – 2019. – Том 13. – № 1. – С. 83-92.
3. Гасман, О. Бизнес-модели: 55 лучших шаблонов: Учебное пособие / Гасман О., Франкенбергер К., Шик М. - Москва :Альпина Пабли., 2016. - 432 с.: ISBN 978-5-9614-5665-3. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/912217> (дата обращения: 18.04.2021). – Режим доступа: по подписке.
4. Маркова В.Д. Бизнес-модели компаний на базе платформ. Вопросы экономики. 2018;(10):127-135. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2018-10-127-135>
5. Межов Степан Игоревич, Болденков Александр Владимирович Понятие бизнес-модели: сущность, типология и основные принципы построения // Экономика Профессия Бизнес. 2016. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ponyatie-biznes-modeli-suschnost-tipologiya-i-osnovnye-printipy-postroeniya> (дата обращения: 11.05.2021).
6. Олифинов А. В., Маковейчук К. А., Петренко С. А. Трансформация бизнес-моделей в условиях цифровой экономики // International Journal of Open Information Technologies. 2019. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transformatsiya-biznes-modeley-v-usloviyah-tsifrovo-y-ekonomiki> (дата обращения: 06.05.2021)
7. Талин, Б. 11 Цифровых Бизнес-Моделей, Которые Вы Должны Знать // MoreThanDigital. URL: <https://morethandigital.info/ru/11-tzifroviye-biznyes-modyeli-kotoriye-vi-dol%CA%90ni-znat-vkl-primyeri/> (дата обращения: 19.04.2021).

EVOLUTION OF CLASSIFICATIONS OF DIGITAL BUSINESS MODELS IN THE FRAMEWORK OF DEVELOPMENT OF THE DIGITAL ECONOMY

Sapozhnikov P. A., master's student of the Department of Innovation and Entrepreneurship, e-mail: paulflse29@gmail.com

Kolozhvari Y. B., Professor of the Department of Innovation and Entrepreneurship, e-mail: ukolo@inbox.ru

Novosibirsk State University of Economics and Management, 630099, Kamenskaya str., 52, Novosibirsk, Russia

Annotation

The aim of the study is to review and analyze the evolution of the main classifications of digital business models of companies in the context of the development of the digital economy. The analysis of the proposed classifications was carried out using the methods of abstraction, analysis, synthesis and systematization. As a result of the work, the main classifications of digital business models were collected, analyzed and described, as well as conclusions were drawn and recommendations were made on the application of these models in the conditions of modern business development.

Keywords: business model, digital economy, digital environment, digital environment, classification.

**ИННОВАЦИИ В
МАШИНОСТРОЕНИИ
(ИнМаш – 2021)**

**INNOVATIONS IN
MECHANICAL
ENGINEERING
(ISPCIME – 2021)**

ХII МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО – ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ, ПОСВЯЩЕННАЯ
ПАМЯТИ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК,
ПРОФЕССОРА РАХИМЯНОВА ХАРИСА
МАГСУМАНОВИЧА

XII INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND
PRACTICAL CONFERENCE
DEDICATED TO THE MEMORY OF
PROFESSOR RAKHIMYANOV KHARIS
MAGSUMANOVICH, DOCTOR OF
TECHNICAL SCIENCES

Сборник трудов

Materials

7 – 9 октября

October 2021

Новосибирск, Россия

Novosibirsk, Russia

Подписано в печать 22.09.2021. Формат 70x100 1/16. Бумага офсетная. Тираж 30 экз.
Уч.-изд. л. 39,02. Печ. л. 30,25. Заказ № 280. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20