

На правах рукописи



СИМОНОВА Юлия Эдуардовна

ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ НА РАБОЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ
УЗЛОВ ТРЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА

Специальность: 05.02.07 - «Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж).

Научный руководитель: **Кадырметов Анвар Минирович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Иванов Владимир Витальевич**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет», профессор
кафедры «Эксплуатация транспортных
средств и логистика»

Салтанаева Елена Андреевна
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО
«Казанский государственный энергетиче-
ский университет», старший преподаватель
кафедры «Информатика и информационно-
управляющие системы»

Ведущая организация: Акционерное общество «Конструкторское
бюро химавтоматики», г. Воронеж

Защита состоится 18 декабря 2020 г. в 14⁰⁰ в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 999.155.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» <http://cchgeu.ru>

Автореферат разослан «15» октября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



Кириллов О.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Совершенствование техники, интенсификация рабочих процессов в машинах приводит к усложнению условий их работы. Требования к повышению надежности техники, обеспечению конкурентоспособности выпускаемой продукции, повышению ресурса машин, их реновация являются актуальной проблемой современного состояния производства при сверхнормативной изношенности оборудования, достигающей до 80 % на отечественных предприятиях.

В условиях современной экономики, в том числе увеличивающегося дефицита сырьевых ресурсов, существующих ограничивающих факторов переноса производства, все большую актуальность приобретают современные технологии обеспечения высокой надежности изношенных деталей машин и придания им заданных свойств и технических характеристик. В большинстве случаев детали машин оборудования выходят из строя из-за износа их рабочих поверхностей. Главной причиной выхода деталей изделий машиностроения из строя при эксплуатации является их неравномерный износ по длине и глубине рабочих поверхностей. Прежде всего, это относится к поверхностям направляющих скольжения станков, износ которых достигает величины 0,04-0,12 мм/год, что существенно сказывается на точности изготовления деталей и проценте брака выпускаемой продукции.

Одним из наиболее распространенных путей решения данной проблемы является нанесение на поверхностях этих изделий защитных покрытий с применением существующих или разработкой более эффективных новых материалов и технологий. Это определяет необходимость и актуальность разработки таких технологий для нанесения и упрочнения специальных износостойких покрытий на поверхности деталей узлов трения, в том числе и в процессах восстановления.

Одним из эффективных направлений решения этих задач в машиностроении является использование прогрессивных газотермических и плазменных методов нанесения и упрочнения покрытий на рабочие поверхности деталей узлов трения, обладающих гибкостью их совершенствования применительно к конкретным деталям и обеспечивающих их высокую надежность и требуемые эксплуатационные характеристики по износо- и коррозионной стойкости, сопротивлению усталости и др. показателям.

Вышеизложенное подтверждает актуальность темы исследования в настоящей работе по разработке технологии нанесения покрытий переменного состава на детали узлов трения, обеспечивающих одинаковую по поверхности износостойкость при различных по величине локальных износных воздействиях.

Цель работы: разработка ресурсосберегающей технологии газопламенного нанесения на рабочие поверхности деталей узлов трения покрытий переменного состава и их плазменного упрочнения, обеспечивающей их высокую износостойкость с заданным равномерным по поверхности эксплуатационным износом при различных локальных износных воздействиях.

Задачи исследования:

1. Провести анализ и систематизацию факторов изнашивания рабочих поверхностей деталей пар трения технологического оборудования; обосновать разработку технологии газотермического нанесения износостойких покрытий для поверхностей с переменным по длине износом на примере направляющих скольжения станков; сформулировать требования к структуре и составу покрытий, обеспечивающих равномерность износа по всей поверхности покрытия во времени при различных локальных износных воздействиях.

2. Провести теоретическое обоснование выбора метода и режимов газотермического нанесения и упрочнения покрытий на рабочие поверхности пар трения на примере направляющих скольжения станков.

3. Разработать методику экспериментальных исследований процесса газопламенного напыления покрытий с последующим плазменным оплавлением и финишным плазменным упрочнением.

4. Экспериментально исследовать процесс газопламенного напыления с плазменным оплавлением покрытий, их финишной плазменной обработкой и получаемые прочностные свойства, износостойкость, структуру для нескольких сочетаний химического состава покрытий и для обеспечения данных требований найти целесообразные режимы нанесения и упрочнения покрытий.

5. Разработать технологию нанесения на рабочие поверхности деталей узлов трения покрытий с переменным по длине составом, провести испытания нанесенных покрытий на направляющих скольжения станков при их восстановлении.

Научная задача работы состоит в достижении поставленной цели при отсутствии научно обоснованных сведений и оценок о достигаемых параметрах комбинированного процесса, сочетающего газопламенное напыление покрытий переменного состава, в том числе сверхзвуковое, с заданным поверхностным распределением износостойкости, и плазменное оплавление с финишным плазменным упрочнением покрытий применительно к плоским поверхностям трения.

Методы и достоверность исследований. При построении работы использовались основные положения технологии машиностроения, теории газодинамики струйных течений в канале сопла, классические положения тепловых процессов, теории плазменной обработки материалов, теория трения и изнашивания твёрдых тел, численные методы, статистические методы моделирования.

Достоверность результатов подтверждается сходимостью теоретических и экспериментальных результатов с применением стандартных методов и методик исследований, применением современных технических средств, хорошим совпадением данных различных исследователей, положительными результатами использования комбинированной технологии на предприятиях машиностроения.

Объект исследования. Газотермические покрытия переменного состава на плоских рабочих поверхностях деталей пар трения технологического оборудования, работающих в условиях возвратно-поступательного движения.

Предмет исследования. Технологические способы, режимы газопламен-

ного напыления и плазменного оплавления покрытий переменного состава на плоских протяженных поверхностях трения с заданным распределением износостойкости на поверхности, обеспечивающим её равномерный эксплуатационный износ, а также техническое обеспечение получения таких покрытий.

Научная новизна работы:

1. Математическая модель комбинированного процесса газопламенного напыления покрытия переменного состава и его плазменного оплавления, включающая описание газодинамических параметров в газопламенной струе и распределения температур при плазменном оплавлении покрытия, позволяющая оценивать оптимальные режимы получения покрытия.

2. Методика расчета параметров комбинированного процесса получения покрытия, отличающаяся последовательным определением целесообразных режимов газопламенного напыления покрытия, его последующего плазменного оплавления и финишного плазменного упрочнения для обеспечения высокой плотности, прочности покрытия и его соединения с основой.

3. Методика расчета локального распределения состава покрытия по поверхности и его нанесения в зависимости от эксплуатационных нагрузок на ней, обеспечивающая равномерную по поверхности интенсивность изнашивания покрытия при эксплуатации и повышение долговечности детали.

4. Новые зависимости критериев комбинированного процесса газопламенного напыления и плазменного упрочнения покрытия переменного состава от его факторов, отличающиеся возможностью определения параметров и режимов процесса с целью создания прочного покрытия с требуемым распределением износостойкости по поверхности.

Практическая значимость:

1. Разработаны технологические рекомендации по режимам комбинированного процесса газопламенного напыления с плазменным упрочнением покрытий переменного состава на деталях узлов трения, обеспечивающие равномерное изнашивание поверхностей при неравномерных локальных эксплуатационных воздействиях, в том числе и на деталях с плоскими поверхностями трения, такими как направляющие скольжения станков.

2. Разработано дозирующее устройство подачи порошка в газопламенную горелку, обеспечивающее возможность регулирования относительного расхода упрочняющего материала по сравнению с основным.

3. Разработан технологический процесс комбинированного газопламенного напыления с плазменным упрочнением покрытий переменного состава на направляющие станков.

4. Подтверждена возможность и целесообразность использования разработанной технологии для восстановления изношенных направляющих скольжения станков.

Вклад соискателя в теорию технологической науки. Теоретическое обоснование получения износостойкого покрытия с заданной высокой износостойкостью переменного состава, обеспечивающего равномерность износа комбинированным процессом его формирования газопламенным напылением, плазменным оплавлением и финишной плазменной обработкой.

Вклад соискателя в выполнение работы. Личное участие при решении всех поставленных задач и получение результатов, имеющих научную и практическую значимость для обеспечения существенного вклада в развитие технологической науки в машиностроении.

Автор защищает:

1. Новый подход к формированию покрытия на направляющих станков с заданной равномерной износостойкостью при локализации различающихся износных воздействиях созданием переменного состава покрытия.

2. Методы расчета технологических параметров для проектирования технологических процессов комбинированного нанесения покрытия переменного состава газопламенным напылением и плазменным упрочнением для получения высокопрочного покрытия с заданной износостойкостью.

3. Создание новой технологической оснастки, обеспечивающей получение покрытий переменного состава с требуемой эксплуатационной стойкостью.

4. Целесообразные режимы нанесения и упрочнения покрытий переменного состава, обеспечивающие заданные прочностные свойства и износостойкость покрытия, технологические рекомендации нанесения на чугунные плоские пары трения сплава переменного состава. Результаты исследований влияния химического состава и структуры покрытия на интенсивность изнашивания по рабочей длине плоских пар трения.

5. Правомомерность применения разработанной технологии нанесения и упрочнения покрытий по результатам испытаний деталей.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях: 48-й Научно-технической конференции ВГТУ, секция «Автоматизированное оборудование» (Воронеж, 2008); XV Российской научно-технической конференции с международным участием (Курск, 2008); VI международной научно-технической конференции (Вологда, 2010); 9-й международной научно-практической конференции (Курск, 2019).

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы прошли проверку в цехах АО НПП «СЭлХА» г. Воронеж, и внедрены в производство для ремонта токарных станков с положительным экономическим эффектом. Материалы проведенных исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова».

Публикации. В соавторстве по теме диссертации опубликовано 13 научных работ, из них 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а также 1 статья в издании, входящем в международную наукометрическую базу Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 130 наименований. Работа изложена на 133 страницах, содержит 49 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен анализ технологических воздействий на эксплуатационные характеристики направляющих скольжения технологического оборудования, обусловленные их изнашиванием.

Рассмотрены основополагающие работы в исследуемой области знаний, выполненные учеными и специалистами научных школ России и за рубежом: Москвы, Санкт-Петербурга, Брянска, Барнаула, Казани, Владимира, Воронежа, Курска, Омска, Перми, Челябинска, а также Украины, Белоруссии, Литвы, Италии, Бразилии, Китая.

По результатам анализа установлено:

1. Сохранение требуемых эксплуатационных свойств направляющих станин технологического оборудования определяется в основном износостойкостью, составляющей величину 0,04 – 0,12 мм/год и более. Такой износ отражается на геометрической точности поверхностей, их относительном положении, точности движения каретки. В конечном итоге даже при выполнении правил эксплуатации и технического обслуживания это отражается на точности изготовления деталей с коэффициентом переноса непрямолинейности направляющих на изделие до ~0,6, на снижении времени наработки до отказа и сроке эксплуатации. Устранение этого недостатка требует создания поверхности с требуемой высокой износостойкостью.

2. Особенностью изнашивания направляющих скольжения станин является неравномерность износа по длине с максимальным значением в средней зоне, когда значительная часть поверхности направляющих по их краям находится в допустимых пределах. С учетом этого фактора задача выполнения требуемой высокой износостойкости направляющих решается созданием переменной износостойкости для обеспечения равномерного эксплуатационного износа, что также целесообразно с экономической точки зрения.

3. Одним из наиболее выгодных технико-экономических подходов получения поверхностей направляющих станин с заданным распределением износостойкости является сочетание процессов нанесения и упрочнения покрытий, а методом их создания – прогрессивные варианты газотермических и плазменных технологий. Использование дополнительной финишной вибромеханической и/или плазменной упрочняющей обработки нанесенных покрытий позволяет залечить микротрещины в покрытии после шлифования, снять остаточные растягивающие напряжения в нем, обеспечить высокую твердость, высокую стойкость к задирам.

4. Среди множества материалов покрытий целесообразным по износостойкости и стоимости является использование недефицитных самофлюсующихся порошковых материалов на железной и/или никелевой основе с добавками хрома, бора и кремния.

Результаты анализа позволили сформировать цель и задачи работы, представленные во введении.

Во второй главе приведено теоретическое обоснование выбора рациональных процессов нанесения и упрочнения износостойких покрытий перемен-

ного состава и условий их проведения на основе математической модели газодинамических процессов напыления покрытия и модели температурного поля при его оплавлении.

Выбор процессов получения покрытия с заданной износостойкостью определялся стоимостью, требованиями высокой прочности покрытия и минимальным термическим воздействием на основу. Использование процесса наплавки ограничивается минимально возможной толщиной слоя, составляющей 0,5 мм для плазменной наплавки и 0,3 мм – для газопламенной наплавки. При износе направляющих поверхностей 0,12 мм/год необходимая толщина покрытия с учетом припуска не будет превышать 0,25 мм. В связи с этим использование наплавки нецелесообразно с точки зрения высоких потерь материала покрытия на его шлифование.

Требованиям высокой прочности покрытия и минимального термического воздействия на основу в газотермических процессах в наибольшей степени удовлетворяет сочетание процессов высокоскоростного газопламенного напыления покрытия и его последующего оплавления, при этом плазменное оплавление имеет преимущество в возможности использования инертных газов и более высоких скоростей оплавления.

Высокоскоростное газопламенное напыление обеспечивает плотную структуру границы покрытия с основой, равномерность структуры покрытия и достаточную прочность соединения частиц с основой. Это объясняется интенсификацией физико-химических процессов взаимодействия частиц с основой за счет увеличения давления во время удара об основу при росте скорости движения. Основанием этого являются представления на основе теории топохимических реакций взаимодействия материалов Ю.Л. Красулина и М.Х. Шоршорова. Высокая интенсивность взаимодействия напыляемых частиц обеспечивает плотное прилегание покрытия к основе и высокую прочность соединения, что, в свою очередь, обеспечивает необходимые условия для качественного последующего оплавления покрытия при снижении риска образования брака. Кроме того, газопламенное напыление не перегревает основу выше 130-150 °С и снижает до возможного минимума её окисление в сравнении с наплавкой. Последующее после напыления оплавление покрытия устраняет в нем пористость, неоднородные включения, улучшает структуру до монолитного уровня.

Для нахождения режимов газопламенного напыления, обеспечивающих целесообразные с точки зрения прочности покрытия скорости и температуры напыляемых частиц, построена математическая модель газодинамических процессов. В модели принимались допущения идеальности газов со слабо меняющимися удельными теплоемкостями при изменении температуры, изоэнтропическим распределением параметров потока, адиабатичности процессов, пренебрежением влияния частиц на газовую струю и отсутствия смещения границы струи с окружающим её воздухом. Распределение параметров газовой фазы внутри сопла горелки описывалось газодинамическими функциями термодинамического состояния газа (безразмерными критериями температуры, давления, плотности) и потока массы (безразмерной площади). Распределение параметров газовой фазы в струе описывалось по известным экспоненциальным соотноше-

ниям их изменения в зависимости от относительной координаты длины потенциального ядра струи. Скорость и температура частиц описывались уравнениями:

$$\frac{d^2 v_{\text{ч}}}{dx^2} = 0,375 \cdot C_d \cdot \frac{\rho}{\rho_{\text{ч}}} \cdot \frac{(v - v_{\text{ч}}) \cdot |v - v_{\text{ч}}|}{r_{\text{ч}}}, \quad (1)$$

$$\frac{dT_{\text{ч}}}{dt} = \frac{3 \cdot \alpha \cdot (T - T_{\text{ч}})}{\rho_{\text{ч}} \cdot r_{\text{ч}} \cdot C_{\text{рч}}}, \quad \text{при } T_{\text{ч}} < T_{\text{пл}}, \quad \frac{df}{dt} = \frac{3 \cdot \alpha \cdot (T - T_{\text{ч}})}{\rho_{\text{ч}} \cdot r_{\text{ч}} \cdot dH}, \quad \text{при } T_{\text{ч}} = T_{\text{пл}}, \quad (2)$$

где v , $v_{\text{ч}}$ – скорость газа и частиц соответственно, м/с; T , $T_{\text{ч}}$ – температура газа и частиц соответственно, К; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления материала частицы, К; C_d – коэффициент лобового сопротивления частицы, рассчитываемый по зависимости Рудингера; ρ , $\rho_{\text{ч}}$ – плотность газа и частиц соответственно, кг/м³; α – коэффициент теплоотдачи, рассчитываемый по зависимости Ранца-Маршалла, Вт/(м²·К); $r_{\text{ч}}$ – радиус частицы, м; $C_{\text{рч}}$ – теплоемкость частиц, Дж/К; dH – удельная теплота плавления, Дж/кг.

Система уравнений решалась численно модифицированным методом Эйлера второго порядка. Полученные распределения параметров по длине сопла и струи позволили определить значения геометрии сопла и дистанции напыления, обеспечивающие максимальные скорости частиц при их незначительном перегреве и условии предотвращения их дробления и разбрызгивания, существенно снижающие качество покрытия. Для металлических расплавленных частиц с используемым для газопламенного напыления размером 30-50 мкм пороговым значением скорости движения для дробления частиц является 350-400 м/с. Такая скорость частиц может быть получена сверхзвуковым соплом горелки, обеспечивающей скорость потока 1,3-1,5 Маха. Это послужило исходной информацией для расчета оптимального профиля сопла или выбора горелки.

Расчетные зависимости параметров гетерогенной двухфазной сверхзвуковой струи, обуславливающие качество наносимого покрытия из порошка на никелевой основе фракцией 30-50 мкм при подаче порошка в закритическую зону сопла, показывают рост скорости и постепенное падение температуры газовой фазы струи в сверхзвуковой части сопла и за его срезом. Рациональная дистанция напыления составила 130-140 мм. На такой дистанции частицы не успевают дробиться и имеют скорость, близкую к максимальной, а также являются расплавленными. При поставляемом фракционном составе частиц 20-60 мкм порошка скорость частиц крупной фракции уменьшается до 1,3-1,5 раз. В этом случае рациональной является дистанция 120-150 мм, при которой достигает максимальной скорости большая доля частиц.

Пульсирующее горение или акустическое воздействие на поток внутри сопла и на струю через механизм увеличения коэффициентов сопротивления движения частиц и теплопередачи им от потока на величину до 30% и более является дополнительным удобным средством управления скоростью и температурой частиц на 30 % и более. Однако это требует усложнения конструкции горелки.

Тепловая задача при оплавлении покрытия необходима для оценки поля температур основы и выбора режимов, обеспечивающих минимальные остаточные напряжения и деформации поверхности. Температура оценивалась с помощью математической модели на основе положений Н. Н. Рыкалина с помощью уравнения предельного состояния процесса распространения тепла в полуограниченном теле без теплоотдачи:

$$T(R, x, \infty) = \frac{q}{2\pi\lambda \cdot R} \cdot e^{-\frac{v \cdot x}{2a}} - \frac{v \cdot R}{2a}, \quad T_m(z) = \frac{2}{\pi \cdot e} \cdot \frac{q \cdot \xi}{v \cdot c_{\gamma} \cdot z^2}, \quad t_m = \frac{z^2}{2a}, \quad \xi = 2 \frac{z}{r_n} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{z}{r_n}\right)^2 + 1} - \frac{z}{r_n} \right], \quad (3)$$

где R – радиус-вектор от теплового источника $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, м; x, y, z – координата продольного перемещения источника тепла, перпендикулярная ему координата на поверхности и координата по глубине основы; ξ – коэффициент, который учитывает распределенность действия источника тепла; r_n – радиус плоского кругового источника тепла, м; q – эффективная мощность источника тепла, Вт; a – коэффициент температуропроводности, м²/сек; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·град; c_{γ} – объемная теплоемкость тела, Дж/(м³·К); $T_m(z)$ – максимальная температура в указанной точке, °С; t_m – время запаздывания прохождения максимальной температуры $T_m(z)$.

Принятые допущения: мощность источника тепла постоянна в течение всего времени нанесения покрытия; источник тепла сосредоточен в элементарном точечном объеме; источник тепла равномерно и прямолинейно перемещается по изделию с постоянной скоростью; распространение тепла в теле происходит по закону теплопроводности Фурье; граница тела непроницаема для теплоотдачи от тела; коэффициенты теплофизических свойств основного металла не зависят от температуры; фазовые и структурные превращения металла покрытия происходят без выделения и поглощения тепла; временем теплонасыщения можно пренебречь.

Результаты расчета позволили определить целесообразный режим оплавления: скорость движения пятна оплавления – 0,15 м/с, эффективная тепловая мощность в пятне оплавления – 1000 Вт. На этом режиме на глубине 2 мм максимальные значения температур T_m в средней зоне направляющей станины не превышают 400 °С, а на гранях направляющих вследствие отражения тепловых волн температуры возрастают до 430-480 °С. На глубине 4 мм температуры не превышают 150-200 °С.

На основании проведенных оценок параметров процессов нанесения и упрочнения износостойких покрытий и целесообразных условий их проведения разработаны и обоснованы гипотезы:

1. Для металлических самофлюсующихся покрытий небольшой толщины (не более 0,25 мм) наиболее высокая степень точности состава, толщины и равномерности изменения этого состава по длине покрытия обеспечивается газодинамическими и тепловыми механизмами формирования покрытия процессов газотермического напыления в сравнении с механизмами процессов наплавки.

2. Целесообразным значением скорости напыляемых металлических ча-

стиц является наибольшая скорость, не превосходящая 350-400 м/с. Это предотвратит дробление расплавленных частиц и тем самым обеспечит плотное прилегание покрытия к основе и высокую прочность его соединения с ней.

3. Увеличение скорости перемещения источника тепла при обеспечении проплавления покрытия малой толщины повышает степень равномерности заданного состава покрытия, уменьшая степень перемешивания материалов покрытия и основы в их межграницном слое.

4. Финишная упрочняющая обработка плазменной струей после шлифования покрытия позволит залечить микротрещины в нем, а также создать сжимающие остаточные напряжения, что обеспечит повышенный ресурс покрытия.

В третьей главе сформулированы общая и частная методики проведения экспериментальных исследований.

Общая методика включает частные методики исследований свойств покрытий на образцах (металлографических, электронномикроскопических, рентгеноструктурных, твердости, изнашивания); выбора целесообразного состава смеси порошков в зависимости от условий трения; выбора целесообразных режимов нанесения и упрочнения покрытий. Для нахождения распределения износостойкости покрытия на различных продольных участках направляющих, соответствующих разным путям трения, принималась кусочно-линейная аппроксимационная зависимость требуемой износостойкости, обеспечивающая равномерный износ (рис. 1). За основу была принята симметричная призматическая направляющая марки СЧ21 (рис. 2).

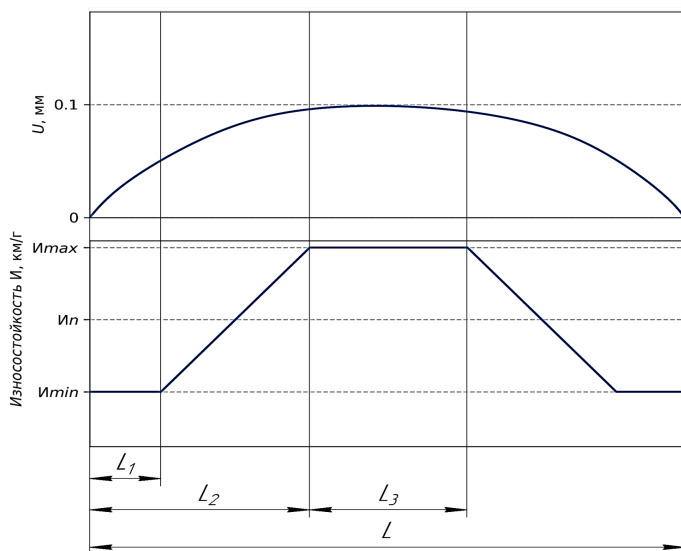


Рис. 1. Реальный профиль после износа U направляющей по её длине L ; желаемое распределение износостойкости II по длине, где L_3 - рабочая зона суппорта (интенсивная зона износа)

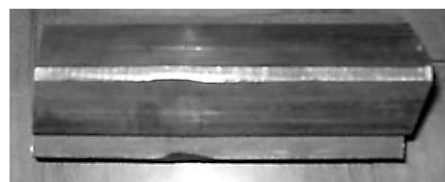


Рис. 2. Фрагмент симметричной призматической направляющей

Для нанесения и упрочнения покрытий на направляющих использовался стенд с приспособлением типа сварочного трактора по известной производственной схеме, применяющейся как для закалики направляющих т.в.ч., так и для напыления покрытия из углеродистой или хромистой стали.

Газопламенное напыление осуществлялось сверхзвуковой газопламенной горелкой, обеспечивающей скорость потока до числа Маха 2,5. С целью равно-

мерности и регулирования расхода смесей напыляемых порошков использовался питатель, представленный на рис. 3.

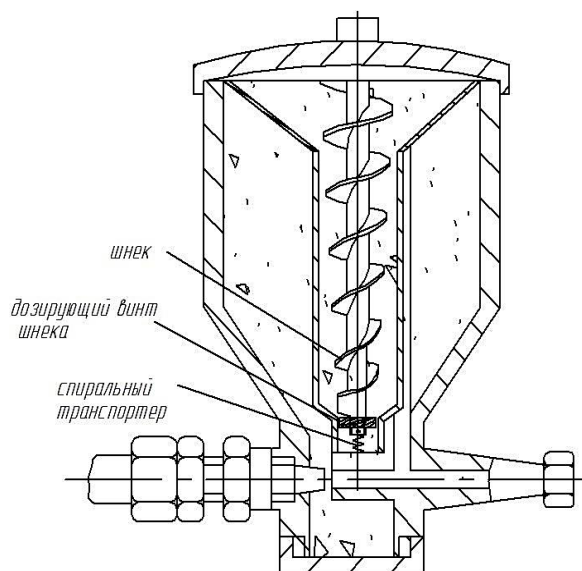


Рис. 3. Схема порошкового питателя

Для покрытий были использованы смеси из порошков самофлюсующихся сплавов на основе никеля и хрома с добавками бора и кремния грануляцией $20 \div 60$ мкм (ТУ 14-22-33-90), предназначенные для оплавления и обеспечивающие необходимые износостойкость, коррозионную стойкость и прочность поверхностей:

ПР-Н65Х25С3Р2
(Ni·1.2C·25Cr·2.7Si·2.5B), ПР-Н77Х15С3Р2 (Ni·0.5C·15Cr·3.2Si·2B).

Микротвердость покрытий определяли по методу Виккерса прибором ПМТ-3. Микроструктуру покрытий определяли на микроскопе МИМ-7, рентгеноструктурный анализ - на дифрактометре Дрон-3,0, а процентное содержание химических

элементов в покрытии определялось на оптико-эмиссионном спектрометре «ИСКРОЛАЙН 100». Измерение остаточных напряжений в поверхностном слое изделия проводилось неразрушающим методом АФЧХ-тестированием прибором «Ситон-Тест». Прочность соединения покрытия с основой определялась методом сдвига. Износостойкость покрытий проводили на машине трения возвратно-поступательного движения на призматических образцах весовым методом в условиях смазки, загрязненной абразивом, а также на направляющих методом вырезанных лунок. Оценку скорости движения частиц порошка проводили с помощью фоторегистрации максимальной длины треков частиц. Оценку температур при оплавлении покрытия проводили с помощью пирометра на поверхности и с помощью термопар внутри образца.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств и износостойкости покрытий с различным составом порошков.

Газопламенное напыление проводили на режиме, взятом из диапазона теоретически обоснованных в главе 2 целесообразных параметров и обеспечивающем скорость частиц грануляцией 20-60 мкм на дистанции 150 мм равную 350-400 м/с: давление кислорода – 2,5 МПа, давление ацетилена – 0,5 МПа, расход кислорода – 22 л/мин, расход ацетилена – 12 л/мин, расход порошка – 2,5 кг/ч, скорость перемещения горелки – 0,0025 м/с. Плазменное оплавление покрытий проводили на оптимальном режиме, обеспечивающем температуру на глубине основы 4 мм не более 200 °С: скорость движения плазмотрона – 0,005 м/с, мощность плазмотрона – 2500 Вт, расход азота – 15 л/мин, дистанция – 50 мм.

Рентгеновская дефектоскопия была проведена фотографическим методом

и показала, что в восстановленном слое внутренних пороков обнаружено не было. Капиллярная дефектоскопия была проведена цветным порошковым методом, и в поверхностном слое материала трещин не выявлено.

Исследование микротвердости напыленной поверхности показало, что максимальные значения имеет покрытие, напыленное смесью порошков ПР-Н77Х15С3Р2 и ПР-Н65Х25С3Р2 в пропорции 1:1. В соответствии с этим целесообразным распределением состава порошков по длине направляющей является

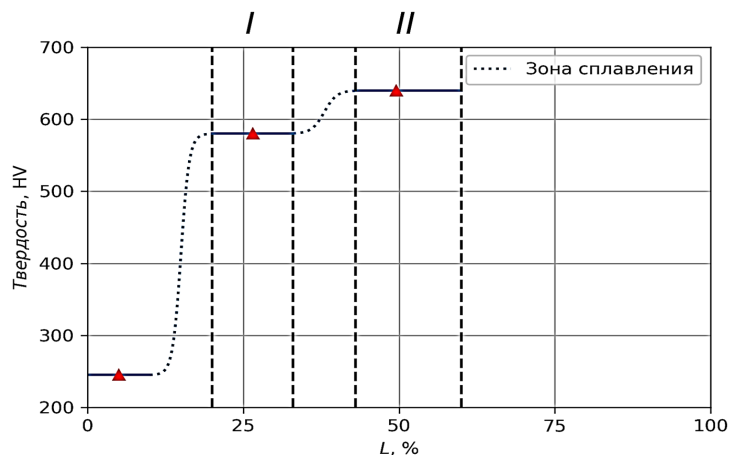


Рис. 4. Экспериментальная зависимость микротвёрдости HV по длине L, определяемой комбинацией материалов:

Δ – результаты изменения микротвёрдости после реализации напыления;

I - напыление порошком ПР-Н65Х25С3Р2;

II – напыление комбинацией порошков ПР-Н77Х15С3Р2 и ПР-Н65Х25С3Р2

распределение, представленное на рис. 4, которому соответствует распределение состава покрытия, представленное в таблице.

Микроструктурные исследования покрытий показали следующее. В микроструктуре серого чугуна в зоне границы сплавления с порошком ПР-Н65Х25С3Р2 наблюдается взаимодействие наплавки с чугуном (местами граница сплавления четкая, при этом наблюдается проникновение материала наплавки в чугун), протекает процесс перераспределения углерода на поверхности чугуна (рис. 5, а).

Микротвёрдость материала в различных слоях образцов

Материал	Микротвёрдость, HV
Основной металл СЧ21	>245
Переходная зона (граница сплавления) СЧ21 – Порошок 1 ПР-Н65Х25С3Р2	290
Порошок 1 ПР-Н65Х25С3Р2	580
Порошок 1+ Порошок 2 Н65Х25С3Р2+Н77Х15С3Р2	640

Серый чугун в области А (рис. 5, б) имеет типичную структуру серого чугуна, которая представляет собой эвтектические изогнутые и скрученные кристаллы графита, что объясняется их свободным ростом. Микроструктура участков металла, расположенного в области Б (рис. 5, б), вблизи к поверхности переходной зоны говорит о начале превращения в перлитной области. Структура представляет собой пластинчатый перлит. Структура в области В (рис. 5, б), непосредственно в переходном участке от серого чугуна к напыленной

поверхности, свидетельствует о выделении незначительного количества карбидов $(\text{FeCr})_3\text{C}$, то есть в матрице исходного мартенсита выделились мелкие частицы карбида. Микроструктура области Г (рис. 5, б), напылённая порошком ПР-Н65Х25С3Р2, трансформируется в структуру, свойственную легированным сталям.

покрытие → граница сплавления → СЧ

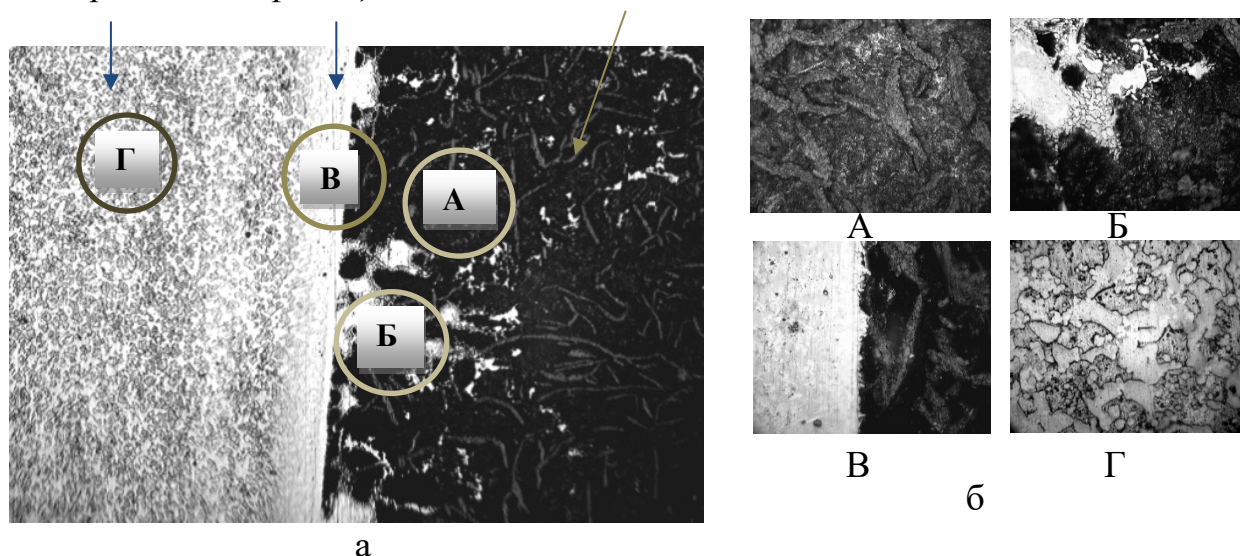


Рис. 5. Структура образца, напылённого порошком ПР-Н65Х25С3Р2: а – общий вид (x100); б - микроструктура напылённого покрытия различным составом (x1000): основной металл - перлит и пластинчатый графит (А); область основного металла, примыкающая к зоне сплавления, - пластинчатый перлит с фрагментами игольчатого строения (Б); зона сплавления - мартенсит и карбиды типа $(\text{FeCr})_3\text{C}$ (В); область, напылённая порошком Н65Х25С3Р2- феррит, бейнит и мартенсит (Г)

Можно предположить, что чёткие границы микроструктуры, соответствующей зоне интенсивного износа – области А (рис. 6, б), напылённой комбинацией порошков ПР-Н65Х25С3Р2 и ПР-Н77Х15С3Р2 (в пропорции 1:1), говорят о преобладании хрома.

Область Б (рис. 6, б) – переходная зона, характеризующаяся отдельными изолированными ферритными зёрнами и перлитом, который растёт веерообразно, также различимы иглы бейнита в мартенсите, что типично для хромистых сталей. Область В (рис. 6, б) при рассмотрении её в направлении от переходной зоны к участку, напылённому порошком ПР-Н65Х25С3Р2, характерна для эвтектоидной стали. Таким образом, установлено, что по продольному направлению восстановленной поверхности направляющей скольжения достигнуто заданное изменение износостойкости путём изменения требуемого химического состава и структуры напылённого слоя.

Анализ эпюры напряжений в покрытии показал, что остаточные напряжения распределены по всей его глубине. Получено, что подповерхностный максимум напряжений находится на глубине 13 мкм покрытия, а его величина составляет +190 МПа. По направлению к поверхности обеспечивается плавное снижение растягивающих напряжений в сжимающие, и на глубине 7 мкм они

достигают отметки -2,3 МПа. Прочность соединения покрытия с основой составила 230-245 МПа. Результаты исследований износостойкости покрытий на призматических образцах на машине трения возвратно-поступательного движения представлены на рис. 7.

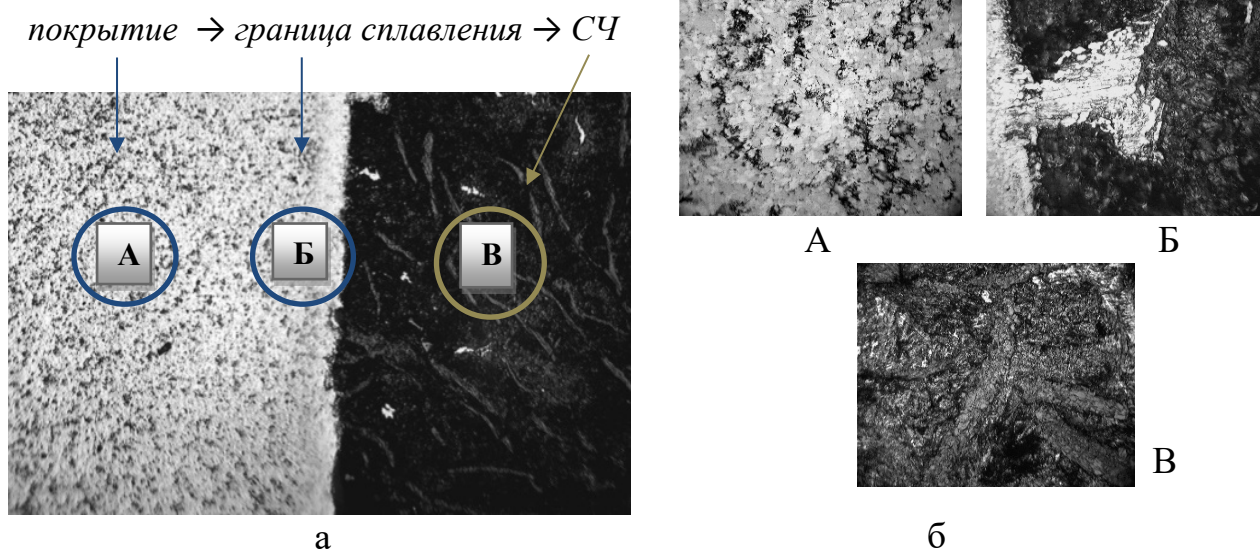


Рис. 6. Структура образца, напыленного комбинацией порошков

ПР-Н65Х25С3Р2 и ПР-Н77Х15С3Р2: а – общий вид (х100); б - область, напылённая комбинацией порошков ПР-Н65Х25С3Р2 и ПР-Н77Х15С3Р2 (х1000): феррит, перлит, бейнит и мартенсит (А); зона сплавления - ферритные зёрна, перлит, бейнитные иглы в мартенсите (Б); область, примыкающая к зоне перехода от линии сплавления к поверхности, напылённой порошком ПР-Н65Х25С3Р2, - игольчатые структуры бейнита (В)

Стендовые испытания на направляющих показали, что в зоне интенсивного износа направляющей, восстановленной смесью порошков ПР-Н65Х25С3Р2 + ПР-Н77Х15С3Р2, – 0,011 мм/год, а в краевых зонах, восстановленных порошком ПР-Н65Х25С3Р2, – 0,01 мм/год. Величина коэффициента трения составила значение в диапазоне 0,14 – 0,18. Задиров не наблюдалось.

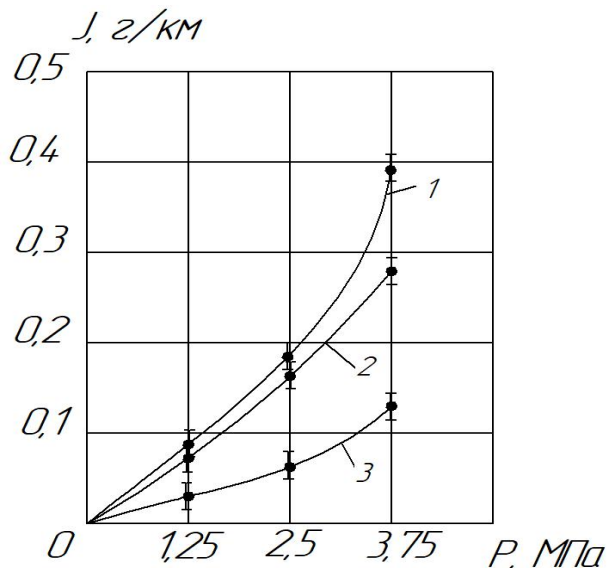


Рис. 7. Зависимость интенсивности изнашивания J от удельного давления P для покрытий из порошков:
1 – ПР-Н65Х25С3Р2;
2 – ПР-Н65Х25С3Р2+ПР-Н77Х15С3Р2 без финишного плазменного упрочнения;
3 – та же смесь порошков с финишным плазменным упрочнением

Результаты исследований подтвердили эффективность сочетания процессов газопламенного напыления и плазменного оплавления покрытий переменного состава и режимов их проведения по физико-механическим свойствам и износостойкости получаемых покрытий. Это позволило подтвердить возможность нанести покрытия с помощью данной технологии на натурные направляющие станков.

В пятой главе представлены рекомендации по применению целенаправленного формирования покрытия переменного состава на поверхностях продольных направляющих с изменяющейся вдоль их длины износостойкостью, работающих в условиях абразивного изнашивания с неравномерным износным воздействием по их длине на примере условий ремонтного производства.

Представлены рекомендуемые режимы газопламенного напыления и плазменного оплавления покрытия. Состав напыляемого порошка менялся по линейному закону в соответствии с заданным изменением износного воздействия на поверхность направляющей, представленному на рис. 1 и 4. Рекомендуемые режимы финишного плазменного упрочнения: сила тока плазмотрона – 58 А, расход плазмообразующего аргона – 3,2 л/мин; расход аргона, транспортирующего смеси Ситол 1 и Ситол 2 – 0,7 л/мин; расход защитного аргона – 1,5 л/мин.

На полученных оптимальных технологических режимах были нанесены и упрочнены покрытия на направляющие станков и проведены производственные испытания их износостойкости на предприятии. Износ определялся методом вырезанных лунок. Он показал, что при использовании одного порошка ПР-Н65Х25С3Р2 для нанесения покрытия по всей длине направляющей износ в средней зоне направляющей составляет 0,015 мм/год, а в крайних зонах – 0,01 мм/год. Использование для наиболее нагруженной части направляющей покрытия из смеси порошков ПР-Н65Х25С3Р2 50 % + ПР-Н77Х15С3Р2 50 %, а в крайних зонах – порошка ПР-Н65Х25С3Р2 обеспечивает равномерный износ по всей длине направляющей $0,01 \pm 0,001$ мм/год. При этом задиров не наблюдалось. Таким образом, использование предлагаемых процессов нанесения и упрочнения покрытий переменного состава на направляющих увеличивает их износостойкость в 2,5-7,5 раз и обеспечивает равномерность износа по всей поверхности, что дополнительно повышает средний ресурс направляющих.

По результатам исследований разработан технологический процесс восстановления изношенных поверхностей направляющих скольжения станков, годовой экономический эффект от применения которого на предприятии г. Воронежа АО НПП «СЭЛХА» составил 100 тыс.р. на один станок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и освоена в промышленности технология нанесения и упрочнения покрытия переменного состава на рабочих поверхностях деталей узлов трения новым способом, включающая сверхзвуковое газопламенное напыление покрытия, его плазменное оплавление и финишное плазменное упрочнение после шлифования, построенная на научно обоснованных положи-

тельных результатах технологических исследований, создании новых схем процессов и устройств для нанесения покрытий и на результатах производственных испытаний.

В соответствии с заключением могут быть сделаны следующие выводы:

1. Для получения прочного покрытия и минимизации остаточных термических напряжений в детали установлены требования к газодинамическим и тепловым параметрам газопламенного напыления и плазменного оплавления, заключающиеся в обеспечении расплавления напыляемых частиц размером 20-60 мкм, их скорости 350-400 м/с, погонном тепловложении оплавляющей плазменной струи ~ 200 кДж/м (отношении эффективной мощности плазменной струи ~ 1000 Вт к скорости её движения $\sim 0,005$ м/с).

2. При неравномерных локальных по длине направляющих станков износных воздействиях на их поверхности для повышения среднего ресурса направляющих предложен способ регулирования состава самофлюсующихся порошков в процессе газопламенного напыления покрытия в зависимости от продольной координаты направляющей, состоящий в увеличении доли более износостойкого порошка в смеси в зонах большего износного эксплуатационного воздействия. Экспериментальная проверка способа была подтверждена производственными испытаниями по критерию равномерного износа направляющих, что уменьшило перенос погрешности на обрабатываемые детали.

3. Определены закономерности формирования структуры и химического состава покрытия в зависимости от пропорционального соотношения составляющих в смеси самофлюсующихся порошков ПР-Н65Х25С3Р2 и ПР-Н77Х15С3Р2, что позволило определять необходимый переменный состав покрытия для получения заданной равномерной износостойкости при различных износных воздействиях. Изменение хрома на 5% при вариациях бора и кремния в пределах 0,5% позволяет регулировать интенсивность изнашивания покрытия до 0,04 мм/год.

4. Определена взаимосвязь структуры покрытий, полученных газопламенным напылением, плазменным оплавлением и финишным плазменным упрочнением, с механическими и эксплуатационными свойствами покрытий, подтвердившая эффективность технологических воздействий на выбранных режимах. Структура покрытия, характерная типичной структуре хромистых сталей, обеспечивает значения износостойкости, превышающие в 2,5 раза и более значения, характерные серым чугунам с пластинчатым перлитом с пластинчатой завихренной формой графита.

5. Разработаны технологические рекомендации предлагаемого комбинированного процесса нанесения покрытий переменного химического состава для упрочнения и восстановления направляющих станков. Разработана технология комбинированного процесса газопламенного напыления с плазменным оплавлением и финишным плазменным упрочнением для нанесения покрытий переменного состава, в том числе и для их восстановления.

6. Использование предлагаемой комбинированной технологии позволяет считать предложенный метод экономически эффективным, дающим возможность увеличить межремонтный период направляющих скольжения до 4,5 раз.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях Scopus

1. Peculiarities of processes of gas-flame application and strengthening of variable composition coatings on friction assemblies / A. Kadyrmetov, J. Simonova, M. Heifitz, S. Yakenko // *Materials Today: Proceedings*. – 2020 (принята к печати).

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

2. Симонова Ю.Э. Повышение эксплуатационных свойств направляющих скольжения напылением слоя переменного химического состава / Ю.Э. Симонова, Ю.С. Ткаченко // *Справочник. Инженерный журнал*. – 2010. – № 8. – С. 39-43.

3. Симонова Ю.Э. Состояние вопроса технологических методов ремонта и восстановления плоских пар трения металлорежущих станков (анализ состояния и перспективы развития) / Ю.Э. Симонова, Ю.С. Ткаченко // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2010. – № 9. – С. 3-7.

4. Симонова Ю.Э. Особенности газопламенного напыления чугунных пар трения металлорежущих станков типа направляющих скольжения / Ю.Э. Симонова, В.М. Пачевский, Ю.С. Ткаченко // *Вестник Магнитогорского технического университета им. Г.И. Носова*. – 2011. – № 3. – С. 67-70.

5. Симонова Ю.Э. Математическое описание процесса газопламенного напыления чугунных направляющих скольжения металлорежущих станков / Ю.Э. Симонова, Ю.С. Ткаченко, В.М. Пачевский // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2012. – Т. 8. – № 3. – С. 79-82.

6. Восстановление направляющих скольжения металлорежущих станков / Б.Н. Квашнин, Ю.Э. Симонова, Ю.С. Ткаченко, В.Н. Гадалов // *Известия Юго-Западного государственного университета*. – 2013. – № 5 (50). – С. 139-141.

Статьи и материалы конференций:

7. Симонова Ю.Э. Выбор материалов и эксплуатационных характеристик плоских пар трения типа направляющих скольжения металлорежущих станков / Ю.Э. Симонова, В.М. Пачевский, Ю.С. Ткаченко // *Материалы и упрочняющие технологии: сб. материалов XV Рос. науч.-техн. конф. с междунар. участием*. – Курск: КГТУ, 2008. – С. 75-79.

8. Симонова Ю.Э. Оценка эксплуатационных характеристик плоских пар трения типа направляющих скольжения металлорежущих станков / Ю.Э. Симонова, Ю.С. Ткаченко, П.А. Овчинников // *48 Научно-техническая конференция ВГТУ. Секций: Автоматизированное оборудование: сб. материалов*. – Воронеж: ВГТУ, 2008. – С. 97-99.

9. Симонова Ю.Э. Выбор метода повышения эксплуатационных характеристик плоских пар трения / Ю.Э. Симонова, Ю.С. Ткаченко, П.А. Овчинников // *48 Научно-техническая конференция ВГТУ. Секций: Автоматизированное оборудование: сб. материалов*. – Воронеж: ВГТУ, 2008. – С. 99-100.

10. Симонова Ю.Э. Оптимизация способов восстановления деталей машин / Ю.Э. Симонова, Ю.С. Ткаченко, В.И. Гунин // *Инновационные технологии и оборудование машиностроительного комплекса: межвуз. сб. науч. тр.* – Воронеж: ВГТУ, 2008. – Вып. 11. – С. 76-80.

11. Симонова Ю.Э. Эффективность технологии ремонта направляющих станин токарных станков с использованием корреляционно-регрессионного анализа / Ю.Э. Симонова, Ю.С. Ткаченко // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы VI междунар. науч.-техн. конф. – Вологда: ВоГТУ, 2010. – Т. 2. – С. 32-36.

12. Симонова Ю.Э. Особенности технологии нанесения покрытия на длинномерные поверхности пар трения / Ю.Э. Симонова, Ю.С. Ткаченко // Сварка и родственные технологии в машиностроении и электронике: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ, 2012. – С. 62-66.

13. Современные технологии плазменных и газотермических процессов нанесения покрытий в открытой атмосфере / А.М. Кадырметов, Ю.Э. Симонова, А.А. Плахотин, Д.В. Колмаков // Современные материалы, техника и технология: сб. науч. статей 9-й междунар. науч.-практ. конф. – Курс: ЮЗГУ, 2019. – Т. 1. – С. 226-238.

Подписано в печать 06.10. 2020

Формат 60x84/16. Формат для множительных препаратов.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ №86

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026, г. Воронеж, Московский просп., 14