

На правах рукописи



Трифонов Григорий Игоревич

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШНЕКА
ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПЛАЗМЕННЫМ
НАПЫЛЕНИЕМ ИЗНОСОСТОЙКОГО КОМПОЗИТНОГО ПОКРЫТИЯ**

05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания
в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ВГТУ»).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Жачкин Сергей Юрьевич.

Официальные оппоненты: **Ли Роман Иннокентьевич,**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», кафедра «Транспортные средства и техносферная безопасность», заведующий кафедрой;
Голубина Светлана Александровна,
кандидат технических наук, Калужский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра «Колесные машины и прикладная механика», доцент.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ).**

Защита состоится 12 мая 2022 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 220.010.04, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ), по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория № 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ и на сайте www.vsau.ru («Информация о деятельности диссертационных советов» – «Защиты» – «Д 220.010.04»), а также по ссылке: <http://ds.vsau.ru/?p=9349>.

Автореферат разослан 18 марта 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день в агропромышленном комплексе (АПК) эффективное использование специального оборудования обеспечивается своевременным техническим обслуживанием и качественным выполнением ремонтных работ. При этом необходимо учесть, что стоимость запасных деталей составляет практически 70 % от общей стоимости проведения ремонта, а стоимость восстановленных деталей – 40...60 % от стоимости новых. Следовательно, задача восстановления с целью дальнейшего использования рабочих узлов и механизмов специального оборудования является актуальной.

Согласно национальному докладу о ходе и результатах реализации в 2020 году Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, а также 502 заседанию Совета Федерации Федерального Собрания Российской Федерации 31 марта 2021 года, в настоящее время значительное внимание необходимо уделять вопросу проведения ремонтных и восстановительных работ сельскохозяйственной техники. В частности, рассмотреть такие пути решения, как модернизация существующих образцов техники, восстановление деталей, механизмов и узлов с упрочнением их рабочих поверхностей путем применения новых технологических процессов и материалов.

В сельском хозяйстве при транспортировке зерновых культур и других сыпучих материалов активно используются шнековые транспортирующие конвейеры, у которых наиболее ответственным агрегатом является шнек. Ресурс и работоспособность конвейера напрямую зависят от степени износа рабочих поверхностей транспортирующего шнека. При этом до 50 % всех проблем, связанных с износом деталей машин в секторе сельского хозяйства, приходится на абразивный износ.

Для восстановления и упрочнения рабочих поверхностей деталей машин и механизмов АПК активно применяют газотермические технологии по нанесению покрытий, в частности, плазменное напыление. Кроме того, одним из перспективных и экономически выгодных путей увеличения ресурса восстанавливаемых деталей является разработка функциональных композитных покрытий и их нанесение на рабочие поверхности деталей сельхозмашин.

Диссертация выполнена в соответствии с комплексной целевой программой ГБ № 2016.39. Научно-исследовательская работа «Теория и практика машиностроительного производства» кафедры «Автоматизированное оборудование машиностроительного производства» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

Степень разработанности темы. При разработке новых функциональных покрытий с высокой износостойкостью, как правило, за основу принимают высоколегированные сплавы на основе никеля или железа. Проблемам восстановления изношенных деталей машин с помощью технологий по нанесению функциональных покрытий посвящены фундаментальные работы таких авторов, как Черноиванов В.И., Завражнов А.И., Жачкин С.Ю., Ли Р.И., Астанин В.К., Кадырметов А.М., Шарифуллин С.Н., Пузряков А.Ф., Ильющенко А.Ф.,

Башкирцев В.И., Бобович Б.Б., Быков В.В., Голубев И.Г., Козырева Л.В., Краснощеков Н.В., Федоренко В.Ф., и др. Тем не менее на сегодняшний день научные исследования по напылению металлопатричных композитов на стальные рабочие поверхности деталей, которые эксплуатируются в условиях абразивного изнашивания, недостаточно изучены.

Настоящая работа посвящена восстановлению рабочих поверхностей деталей транспортирующих устройств АПК, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, плазменным напылением износостойких композитных покрытий.

Объектом исследования являются композитные покрытия на основе порошка ПР-НХ17СР4, нанесенные газотермическим способом плазменного напыления на рабочие поверхности шнека транспортирующего конвейера.

Предмет исследования: физико-механические свойства дисперсно-наполненных композитных покрытий, полученных способом плазменного напыления.

Цель работы: повышение износостойкости и снижение себестоимости восстановления рабочих поверхностей шнека транспортирующего конвейера газотермическим способом плазменного напыления износостойкого композитного покрытия.

Задачи исследования:

1) получить аналитические зависимости кинематических режимов плазменного напыления от геометрических особенностей рабочих поверхностей шнека при формировании износостойкого композитного покрытия;

2) разработать новый состав дисперсно-наполненного композитного материала для плазменного напыления износостойких покрытий;

3) определить рациональные технологические режимы нанесения композитного материала плазменным напылением;

4) построить регрессионные модели зависимостей физико-механических свойств нанесенных покрытий на рабочие поверхности шнека от технологических параметров плазменного напыления;

5) разработать оборудование для плазменного напыления, позволяющее получать качественные композитные покрытия на винтовых и цилиндрических поверхностях шнека.

Научная новизна работы:

1) получены аналитические зависимости формообразования композитных покрытий на основе самофлюсующегося порошка ПР-НХ17СР4, отличительной особенностью которых является учет геометрических форм восстанавливаемой сложнопрофильной детали;

2) разработан состав дисперсно-наполненного композитного материала для плазменного напыления рабочих поверхностей шнека транспортирующего конвейера, отличительной особенностью которого является учет размеров и концентрации наполнителя, позволяющего получать износостойкое композитное покрытие с повышенной прочностью сцепления с основой;

3) разработаны технологические режимы плазменного напыления дисперсно-наполненного композитного материала, отличающиеся корректи-

ровкой параметров в зависимости от дисперсности и концентрации наполнителя исходного порошка композитного покрытия;

4) получены регрессионные модели, связывающие параметры напыления с физико-механическими и эксплуатационными характеристиками сформированных композитных покрытий, отличительной особенностью которых является содержание предикторов как электрической, так и механической составляющей процесса получения композитного покрытия, так и предикторов концентрации и дисперсности наполнителя;

5) разработана установка для нанесения композитных материалов на поверхности деталей плазменным напылением, отличающаяся тем, что плазмотрон выполнен с возможностью вращения в двух перпендикулярных проекциях двух координатных плоскостей по заданной программе, а также дополнительно введёнными элементами, обеспечивающими корректировку управляющей программы напыления в зависимости от геометрических особенностей детали и дефектов на её восстанавливаемой поверхности.

Теоретическая значимость работы заключается в получении и обосновании аналитических зависимостей, связывающих технологические режимы плазменного напыления с физико-механическими и эксплуатационными характеристиками сформированного композитного покрытия с целью обеспечения его качественно-точностных параметров.

Практическая значимость работы. Разработан состав дисперсно-наполненного композитного материала, состоящего из непрерывной фазы – самофлюсующегося порошка ПР-НХ17СР4 и дисперсной фазы – карбида титана (TiC). Сформированное покрытие из разработанного композитного материала на рабочих поверхностях шнека обладает высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Разработаны технологические режимы плазменного напыления дисперсно-наполненного композитного материала, обеспечивающие высокую когезию и износостойкость покрытия, а также необходимую прочность его сцепления с основой.

Разработана установка для нанесения композитных материалов на поверхности деталей плазменным напылением, обеспечивающая высокую точность перемещения плазмотрона относительно обрабатываемой поверхности детали, что напрямую оказывает положительное влияние на качество формируемого покрытия.

Методология и методы исследования. Исследования проводились с использованием методов системного анализа и теории электрофизического формообразования поверхностного слоя. Научная методика исследования заключается в комплексном рассмотрении взаимосвязи технологических режимов плазменного напыления, прочности сцепления покрытия с основой, твердости, микротвердости, износостойкости и микроструктуры сформированного покрытия. Экспериментальные исследования проведены с использованием современных стандартизированных методик на сертифицированном оборудовании и разработанной установке. Результаты исследований обрабатывались с использованием методов дисперсионного и регрессионного анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1) аналитические зависимости формирования композитных покрытий плазменным напылением, учитывающие геометрические формы восстанавливаемой сложнопрофильной детали;

2) состав дисперсно-наполненного композитного материала: порошок ПР-НХ17СР4 фракцией 40-64 мкм – 76,5 % и TiC фракцией 63-80 мкм – 23,5 % для нанесения покрытий плазменным напылением, обеспечивающий высокую прочность сцепления покрытия с основой и износостойкость;

3) технологические режимы плазменного напыления композитного покрытия 76,5 % ПР-НХ17СР4 + 23,5 % TiC при напряжении на дуге 260 В – сила тока дуги плазматрона 233...248 А, дистанция напыления 81...83 мм, массовый расход напыляемого материала 0,4...0,5 г/с, скорость вращения детали 35...37 мин⁻¹ (для цилиндрической поверхности), подача 4...6 мм/об (для цилиндрической поверхности), скорость перемещения плазматрона 3...7 мм/мин (для винтовой поверхности), объемный расход плазмообразующего газа 0,8...1,8 л/с, позволяющие создавать требуемую микро- и макроструктуру нанесенного слоя в 2,52 раза превосходящую по износостойкости упрочняющий слой, выполненный легированным материалом из порошка ПР-НХ17СР4;

4) результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик износостойкого композитного покрытия, нанесенного газотермическим способом плазменного напыления;

5) установка для нанесения композитных материалов плазменным напылением, позволяющая наносить качественные функциональные покрытия за счет высокой точности перемещения плазматрона относительно обрабатываемой поверхности детали.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных в диссертационной работе научных результатов обеспечивается обоснованным выбором допущений и ограничений, которые соответствуют конкретным условиям и эксплуатационным особенностям шнека транспортирующего конвейера, корректностью постановки решаемых задач, применением комплекса современных методов исследования, необходимым объемом экспериментальных данных, а также повторяемостью основных выявленных закономерностей.

Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на международной научно-практической конференции, посвященной 115 годовщине со дня рождения профессора Харитончика Ефима Мироновича «Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения» (2017 г., г. Воронеж); международной научно-практической конференции «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн» (2017 г., г. Тамбов); международной конференции «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений» (2018 г., г. Тамбов); всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции с элементами научной школы для молодых ученых «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» (2018 г. и 2019 г., г. Казань); международной научно-практической конфе-

ренции «Инновационные технологии в машиностроении» (2019 г., г. Томск); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК» (2019 г., г. Ставрополь); международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (2019 г. и 2021 г., г. Москва); международной конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (2019-2021 г.г., г. Севастополь); научном семинаре технологов-машиностроителей «Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий» (2021 г., г. Ростов-на-Дону).

Результаты диссертационных исследований внедрены в ООО «ИНОКС РЕМ» и ООО «Совтех», что подтверждено соответствующими актами.

Личный вклад соискателя заключается в постановке задач исследования, выборе методов, разработке методики исследований, выполнении математических преобразований, получении и реализации на ЭВМ аналитических зависимостей, разработке программных продуктов по определению кинематических режимов напыления, выполненных лично автором; подготовке публикаций по теме диссертационной работы, проведении экспериментов, формулировке выводов, предложений и рекомендаций, выполненных при участии автора.

Публикации. Результаты проведенных исследований опубликованы в 39 научных статьях, в том числе шестнадцать статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций. По результатам диссертационной работы получено два патента Российской Федерации на изобретение и три свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 180 наименований и 4 приложений. Диссертация изложена на 166 страницах машинописного текста, включает 51 рисунок и 22 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, представлена общая характеристика работы и научные положения, выносимые на защиту. Определены цель, объект и предмет исследования, изложена научная новизна, практическая значимость работы, апробация.

В разделе 1 «Обзор исследований и разработок по восстановлению изношенных деталей машин агропромышленного комплекса» проанализированы условия эксплуатации, характер изнашивания и величина износов рабочих поверхностей шнека транспортирующего конвейера. Также проведен анализ существующих способов восстановления изношенных поверхностей деталей машин АПК. Обоснованы преимущества применения технологии плазменного напыления композитных покрытий по сравнению с другими способами восстановления деталей. Определены основные факторы, влияющие на качество и прочностные свойства износостойких композитных покрытий. Показано, что улучшение свойств композитного материала возможно лишь при комплексном воздействии на технологические параметры процесса напыления.

Отмечено, что необходимы теоретические исследования, которые позволят разработать технологию восстановления винтовой и цилиндрической поверхностей шнека транспортирующего конвейера АПК износостойким композитным покрытием.

Выполненный обзор позволил оценить степень разработанности темы и сформулировать задачи исследования:

1) получить аналитические зависимости кинематических режимов плазменного напыления от геометрических особенностей рабочих поверхностей шнека при формировании качественного износостойкого покрытия;

2) разработать новый состав дисперсно-наполненного композитного материала для плазменного напыления износостойких покрытий;

3) определить рациональные технологические режимы нанесения композитного материала плазменным напылением;

4) построить регрессионные модели зависимостей физико-механических свойств нанесенных покрытий на рабочие поверхности шнека от технологических параметров плазменного напыления;

5) разработать оборудование для плазменного напыления, позволяющее получать качественные композитные покрытия на винтовых и цилиндрических поверхностях шнека.

В разделе 2 «Теоретические исследования процесса плазменного напыления композитного материала на рабочие поверхности шнека» рассмотрены теоретические предпосылки повышения эффективности восстановления деталей ответственных узлов сельскохозяйственной техники плазменным напылением композитных материалов.

Получены аналитические зависимости:

1) кинематических режимов плазменного напыления от геометрических особенностей детали;

2) формирования толщины покрытия и температуры нагрева восстанавливаемых поверхностей детали от кинематических режимов напыления;

3) величины смещения изотермы плавления относительно изотермы контакта.

При активной эксплуатации транспортирующего конвейера наблюдается сильный износ вала и транспортирующих витков винта шнека. С целью устранения локального износа и получения качественного равнотолщинного композитного покрытия, необходимо определить скорость перемещения плазматрона относительно винтовой v_1 (м/с) и цилиндрической поверхностей v_2 (м/с) шнека.

Скорость перемещения плазматрона относительно винтовой поверхности шнека

$$v_1 = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\pi^2 \left((dtg\varphi_1)^2 + D_1^2 \right)} - \sqrt{\pi^2 \left((dtg\varphi_1)^2 + D_2^2 \right)}}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)^2}, \quad (2.1)$$

где φ_1 – угол подъема винтовой линии; D_1 – диаметр внешней винтовой линии, м; D_2 – диаметр внутренней винтовой линии, м; α – угол выреза; $\frac{\partial \varphi}{\partial t}$ – скорость

вращения обрабатываемой детали, м/с; $\frac{\partial z}{\partial t}$ – продольная скорость перемещения плазматрона, м/с.

Скорость перемещения плазматрона относительно цилиндрической поверхности шнека

$$v_2 = \sqrt{r^2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)^2}, \quad (2.2)$$

где r – радиус вала шнека, м.

В результате перемещения плазматрона относительно винтовой и цилиндрической поверхностей шнека напыляемый материал осаждается в виде полуваляков. Для получения покрытий на поверхностях шнека, напыление должно производиться в три ряда и более. При этом смещение оси плазменного потока устанавливается так, чтобы при напылении произошло взаимное наложение и частичное перекрытие соседних полуваляков.

Учитывая полученные уравнения (2.1) и (2.2), выводим уравнения для расчета толщины покрытия на рабочих поверхностях шнека.

Толщина нанесенного слоя на винтовой поверхности шнека H_1 (мкм)

$$H_1 = \frac{\delta \times \sqrt{\pi b}}{\sqrt{\left(\frac{\sqrt{\pi^2 \left((\text{d}tg \varphi_1)^2 + D_1^2 \right) - \sqrt{\pi^2 \left((\text{d}tg \varphi_1)^2 + D_2^2 \right)}}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)^2}} \times \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{b^2}\right) + \exp\left[-\frac{1}{b^2}(x-A)^2\right] + \exp\left[-\frac{(x+A)^2}{b^2}\right] \right\}, \quad (2.3)$$

где δ – коэффициент, характеризующий скорость увеличения толщины покрытия в центре пятна распыла; A – расстояние между рядами (шаг смещения), мкм; b – радиус пятна распыления, мкм; x – координата движения сопла плазматрона относительно плоскости напыления детали, мкм.

Толщина нанесенного слоя на цилиндрической поверхности шнека H_2 (мкм)

$$H_2 = \frac{\delta \times \sqrt{\pi b}}{\sqrt{r^2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)^2}} \times \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{b^2}\right) + \exp\left[-\frac{1}{b^2}(x-A)^2\right] + \exp\left[-\frac{(x+A)^2}{b^2}\right] \right\}. \quad (2.4)$$

Одна из основных характеристик, описывающих технологию плазменного напыления – температура нагрева в разных точках зоны термического воздействия детали, подвергаемой обработке. Для анализа тепловых потоков, приходящих на винтовую и цилиндрическую поверхности шнека, использовалась модель лучистого и конвективного теплообмена, которая основана на теории пограничного слоя.

С целью недопущения коробления шнека при его восстановлении, а также для точного назначения рабочего параметра плазменного напыления – силы тока дуги плазматрона, проводились исследования в области нагрева детали при плазменной обработке.

По результатам исследований получены уравнения температуры нагрева винтовой T_1 (К) и цилиндрической T_2 (К) поверхностей шнека, а также величины смещения изотермы плавления относительно изотермы контакта Δ_T (м).

Температура нагрева винтовой поверхности шнека

$$T_1 = k_i \left(\frac{0,12\eta_u UI}{\pi \times \left(\frac{\lambda'_{M1} + \lambda'_{M2}}{2} \right)^{1-P} \times \lambda_B^P \times \sqrt{\frac{\left(\sqrt{\pi^2 \left((dtg\varphi_1)^2 + D_1^2 \right) - \sqrt{\pi^2 \left((dtg\varphi_1)^2 + D_2^2 \right)}} \right)^2}{\alpha}} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)^2} \right) \times \left(\frac{\exp\left(\frac{z_1^2 c \rho_c}{4\lambda_0 \tau} \right)}{\sqrt{(\tau(1/4ak + \tau) \pm const)}} + T_0 \right) \times \frac{2\alpha_0}{c_0 \rho_v L} + T_0, \quad (2.5)$$

температура нагрева цилиндрической поверхности шнека

$$T_2 = k_i \left(\frac{0,12\eta_u UI}{\pi \times \left(\frac{\lambda'_{M1} + \lambda'_{M2}}{2} \right)^{1-P} \times \lambda_B^P \times \sqrt{r^2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)^2}} \right) \times \frac{2\alpha_0}{c_0 \rho_v L} + T_0, \quad (2.6)$$

$$\left(\frac{\exp\left(\frac{z_1^2 c \rho_c}{4\lambda_0 \tau} \right)}{\sqrt{(\tau(1/4ak + \tau) \pm const)}} + T_0 \right)$$

где η_u – эффективный КПД процесса нагрева; U – падение напряжения на дуге, В; I – сила тока, А; λ'_{M1} и λ'_{M2} – коэффициенты теплопроводности двухфазного композитного материала, определяемые по формулам Оделевского и Миснара; λ_B – коэффициент теплопроводности газа; c_0 – теплопроводность транспортирующего газа, Вт/мК; c – теплопроводность покрытия, Вт/мК; α_0 – коэффициент теплоотдачи (в общем случае он отражает совместное действие конвекции (α_k) и излучения (α_p), то есть $\alpha = \alpha_k + \alpha_p$; ρ_v – плотность газа при соответствующей температуре, кг/м³; L – толщина стенок винтовой поверхности шнека, м; T_0 – начальная температура материала шнека, К; λ_0 – коэффициент теплопроводности двухфазного композитного материала; τ – время движения частиц в плазменной струе, сек; a – коэффициент температуропроводности материала шнека; z_1 – глубина пятна нагрева, м; P – пористость покрытия; k – коэффициент сосредоточенности плазменного источника нагрева; ρ_c – плотность покрытия, кг/м³; k_i – коэффициент изменения температуры нагрева поверхности детали, учитывающий отражение тепловых волн.

Величина смещения изотермы плавления относительно изотермы контакта

$$\Delta_T = \frac{(T_N - T_K)}{(T_K - T)} \sqrt{\pi a \tau_1}, \quad (2.7)$$

где T_N – температура плавления материала шнека, К; T_K – температура контакта композитного покрытия и подложки, К; τ_1 – время нагрева поверхностного слоя шнека, сек.

На основе полученных аналитических зависимостей разработаны программные продукты, позволяющие моделировать процесс плазменного

напыления деталей с различной геометрией ее рабочих поверхностей и назначать технологические режимы плазменного напыления.

В разделе 3 «Методика экспериментальных исследований» описывается общая методика исследования и частные методики исследования физико-механических и эксплуатационных свойств композитных покрытий на основе самофлюсующегося порошка ПР-НХ17СР4 с повышенной прочностью сцепления покрытия с основой и износостойкостью.

Исследования проводились на образцах изготовленные по ГОСТ 103-2006 толщиной 20 мм и шириной 75 мм из стали 20Х (углерод (С): 0,17-0,23 %, кремний (Si): 0,17-0,37 %, марганец (Mn): 0,5-0,8 %, никель (Ni) до 0,3 %, сера (S) до 0,035 %, фосфор (P) до 0,035 %, хром (Cr): 0,7-10 %, медь (Cu) до 0,3 %) согласно ГОСТ 4543-71.

Напыление образцов производилось согласно ГОСТ 28076-89 на установке плазменного напыления УПУ-3Д с плазмотроном ПНК-50 с межэлектродной вставкой, широко применяющихся на предприятиях, специализирующихся на ремонте и восстановлении деталей машин и специального оборудования АПК.

В ходе проведения экспериментальных исследований по напылению винтовых и цилиндрических поверхностей шнека на базе установки УПУ-3Д была разработана установка для нанесения композитных материалов плазменным напылением, позволяющая получать качественные композитные покрытия на винтовых и цилиндрических поверхностях шнека за счет корректировки управляющей программы напыления в зависимости от геометрических особенностей детали и дефектов на её восстанавливаемой поверхности.

Дисперсно-наполненный композитный материал, использующийся для напыления на изношенные поверхности шнека, основан на самофлюсующемся порошке ПР-НХ17СР4 (ГОСТ 21448-75): (17 % хрома (Cr), 4,1 % кремния (Si), 3,6 % бора (B), железа (Fe) не более 5 % и 1 % углерода (C)). Наполнителем композитного материала в ходе проведенных исследований был выбран TiC (ТУ 304-2002).

В результате напыления формировалось износостойкое покрытие, в состав которого входили основные элементы матрицы порошка ПР-НХ17СР4 и наполнитель TiC. При этом на нижнем уровне покрытия был сформирован слой, который включал в себя небольшое количество синтезированного на месте Cr_7C_3 , что также обеспечило повышение износостойкости композитного покрытия.

Прочность сцепления композитного покрытия с основой определялась методом скретч-тестирования, который объединил в себе простоту существующих методов оценки прочности сцепления покрытия с основой с точным методом отрыва за счет цифровых технологий. Царапины проводились алмазным индентором конической формы на установке Макро Скретч Тестер Revetest Express с постоянной нагрузкой в 34 Н согласно ASTM D 2197, ASTM C1624, а также в соответствии с международными стандартами ISO 19252:2008, ISO 20502.

Твердость композитного покрытия H_v (HRC) измерялась на твердомере ПМТ-3 при нагрузке 50 Н по ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86) по методу Роквелла. Данный метод заключается во вдавливании алмазного конуса в предварительно зашлифованную поверхность образца.

Микротвердость композитного покрытия также измерялась на твердомере ПМТ-3 при нагрузке 10 Н по ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78) в поперечном сечении образца. Микротвердость H_M (Па) определялась путем деления нагрузки на площадь боковой поверхности полученного отпечатка.

Металлографический анализ производился согласно ГОСТ 1778-70 с использованием оптического микроскопа Axiovert 40 MAT. С целью выявления структурных составляющих композитного покрытия микрошлифы исследовались без предварительного травления. Химический состав покрытия исследовался на искровых оптико-эмиссионных спектрометрах PMI MASTER Pro и ДФС-500.

Определение износостойкости композитного покрытия проводилось на машине трения СМЦ-2 согласно ГОСТ 23.208-79. Использовался абразивный материал – электрокорунд зернистостью 16-П по ГОСТ 3647-80 с относительным содержанием влаги не более 0,15 %. Для оценки износостойкости использовались прецизионная система измерения шероховатости и контура деталей, профилограф и аналитические весы.

При проведении экспериментальных исследований по определению износостойкости композитного покрытия была разработана машина для испытаний деталей на абразивный износ, которая обеспечила повышение адекватности условий испытаний образцов путем создания реальных динамических взаимодействий между испытываемыми образцами и абразивной средой.

Эксплуатационные испытания шнеков транспортирующих конвейеров проводились с целью определения показателей их долговечности. В конвейеры устанавливались новые и восстановленные шнеки, которые обладали геометрическими параметрами, отвечающими требованиям технических условий ТУ 3167-001-00285178-99.

В разделе 4 «Экспериментальное исследование процесса нанесения композитных покрытий плазменным напылением» приведены результаты исследований по определению состава композитного материала и рациональных технологических режимов нанесения покрытий плазменным напылением, а также их влияния на физико-механические и эксплуатационные характеристики сформированных покрытий на рабочих поверхностях шнека.

В ходе предварительных исследований были выделены основные параметры плазменного напыления (таблица 4.1) для проведения многофакторного эксперимента.

Таблица 4.1 – Основные характеристики многофакторного эксперимента

Наименование фактора	Диапазон факторов
Ток дуги плазмотрона I , А;	200 – 250
Дистанция напыления l , мм;	50 – 150
Скорость вращения детали (для цилиндрической основы) n , об/мин;	35 – 55
Подача (для цилиндрической основы) s , мм/об;	4 – 6
Скорость перемещения плазмотрона (для винтовой основы) v , мм/мин;	3 – 7
Объемный расход плазмообразующего газа, Q_G , л/с;	0,8 – 1,8
Массовый расход напыляемого материала, m_{II} , г/с	0,3 – 0,5

Получено уравнение регрессии, описывающее зависимость адгезии от размера (X_1) и концентрации (X_2) наполнителя (TiC) композитного материала

$$C = -324,83 + 5,89X_1 + 41,45X_2 - 0,04X_1^2 - 0,88X_2^2. \quad (4.1)$$

Центр оптимума полученной функции 4.1 определялся с использованием программного комплекса «MathCad». По основе анализа двумерного сечения (рисунок 4.1) определена область оптимума критерия наивысшей прочности сцепления покрытия с основой и выбран рациональный состав композитного материала: карбид титана с дисперсной фазой 73,6 мкм (63-80 мкм) – 23,5 %; порошок ПР-НХ17СР4 (40-64 мкм) – 76,5 %.

Прочность сцепления композитного покрытия со стальной основой при данном составе напыляемого порошка достигает наибольшего значения – 380,093 МПа.

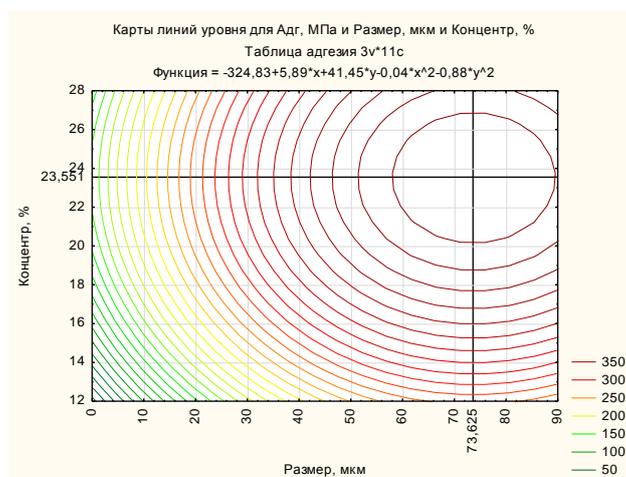


Рисунок 4.1 – Поверхность отклика

По итогу регрессионного анализа получены зависимости прочности сцепления покрытия с винтовой основой $C_{ВИ}$ (Па) и цилиндрической основой $C_{ЦП}$ (Па) от технологических режимов напыления

$$C_{ВИ} = 302,082 + 0,086I - 0,33l - 96,2m + 0,001Il + 0,348Im, \quad (4.2)$$

$$C_{ЦП} = 93,86 + 1,11I - 0,28l - 0,42n. \quad (4.3)$$

Характер изменения прочности сцепления композитного покрытия, состоящего из порошка ПР-НХ17СР4 и TiC, с основой от дистанции напыления показан на рисунке 4.2.

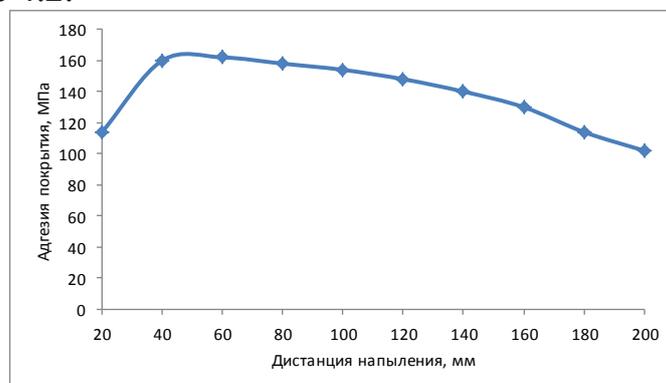


Рисунок 4.2 – Зависимость прочности сцепления композитного покрытия с основой от дистанции напыления

Видно, что на начальном этапе с ростом дистанции напыления в исследуемом диапазоне происходит незначительное повышение прочности сцепления. Это объясняется тем, что дистанция напыления должна выбираться при определенном условии, то есть подложка должна быть расположена в зоне, где начинается остывание частиц, и при этом не должен происходить перегрев основы детали плазменной струей.

Используя программный комплекс «Excel», были получены рациональные технологические режимы плазменного напыления при нанесении композитных покрытий как на винтовые, так и на цилиндрические поверхности шнека при напряжении на дуге 260 В (таблица 4.2).

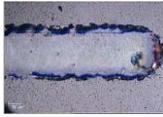
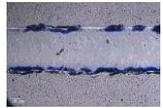
Таблица 4.2 – Технологические режимы плазменного напыления

Технологические режимы напыления	Интервалы значений
Ток дуги плазмотрона I , А;	233 – 248
Дистанция напыления l , мм;	81 – 83
Скорость вращения детали (для цилиндрической основы) n , об/мин;	35 – 37
Подача (для цилиндрической основы) s , мм/об;	4 – 6
Скорость перемещения плазмотрона (для винтовой основы) v , мм/мин;	3 – 7
Объемный расход плазмообразующего газа, Q_g , л/с;	0,8 – 1,8
Массовый расход напыляемого материала, m_{II} , г/с	0,4 – 0,5

С целью подтверждения теоретических изысканий о прочности сцепления покрытия с основой были проведено исследование адгезионной прочности методом скрэтч тестирования (таблица 4.3).

Разрушение у образцов № 1, 2, 4 происходило путем растрескивания в плоскости, перпендикулярной направлению роста покрытия от края, что выразилось в образовании трещин внутри царапины при заданной нагрузке. У образца № 3 трещин не наблюдалось на всем протяжении испытаний.

Таблица 4.3 – Результаты исследований адгезионной прочности

№ образца	Тип покрытия	Нагрузка, Н	Внешний вид покрытия
1	ПР-НХ17СР4	34	
2	ПР-НХ17СР4 +18% TiC	34	
3	ПР-НХ17СР4 +23,5% TiC	34	
4	ПР-НХ17СР4 +30% TiC	34	

Уравнение регрессии, описывающее зависимость твердости H_v (HRC) от параметров напыления, имеет вид

$$H_v = 59,02 + 0,022 I + 0,0064 l + m. \quad (4.4)$$

На рисунке 4.3 представлены результаты проведенных исследований на микротвердости покрытий.

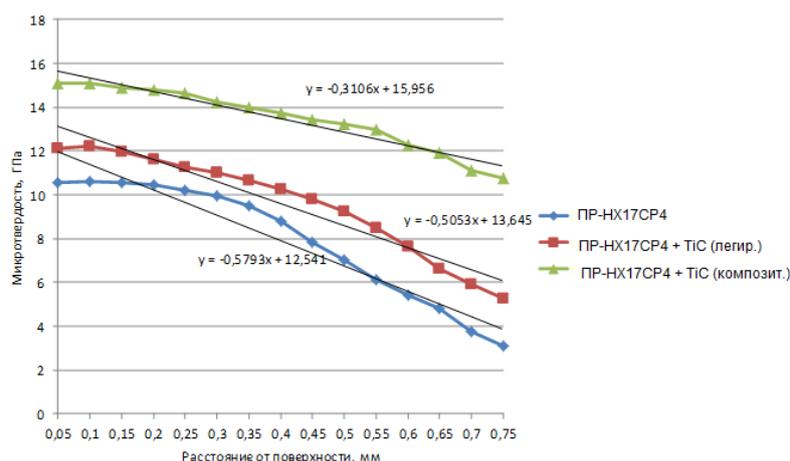


Рисунок 4.3 – Графическая интерпретация проведенных исследований микротвердости покрытий

Наилучшей равномерностью микротвердости покрытия по толщине обладает композитное покрытие из ПР-НХ17СР4+TiC. Скорость падения микротвердости в зависимости от его толщины выше у легированных покрытий ПР-НХ17СР4+TiC в 1,64 раза, а у стандартных покрытий ПР-НХ17СР4 в 1,87 раза.

Исследования износостойкости композитных покрытий проводились согласно ГОСТ 23.208-79. Для каждого исследуемого типа покрытия было проведено три повторных опыта с разными образцами. На рисунке 4.4 представлены графики, выражающие зависимость износа испытуемых образцов от давления при различных скоростях скольжения.

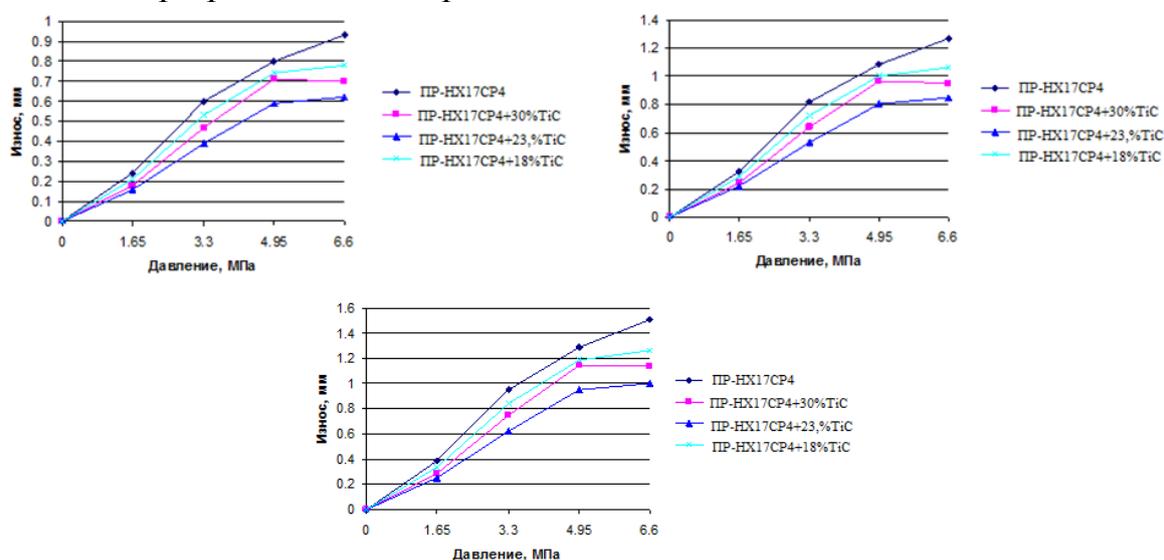


Рисунок 4.4 – Зависимость износа образцов от нагрузки и скорости вращения диска: а) – 0,3 м/с; б) – 0,5 м/с; в) – 0,7 м/с

Металлографические исследования образцов с покрытием ПР-НХ17СР4 показали, что твердость уменьшается от периферии вглубь образца. Следовательно, как только происходит изнашивание верхнего слоя покрытия, обнажается менее упрочненный слой и интенсивность изнашивания резко возрастает. Образцы с покрытием из композитного материала ПР-НХ17СР4+23,5 % TiC имели значительно меньший износ в связи с тем, что структура нанесенного слоя по глубине имела твердость почти такую же, как и верхний слой. Поэтому

по мере износа верхних слоев твердость покрытия и интенсивность послойного износа практически не менялись.

Проводя анализ износа исследуемых покрытий, можно утверждать, что износостойкость композитного покрытия ПР-НХ17СР4+23,5 % TiC превосходит аналогичный показатель у покрытия ПР-НХ17СР4 в 2,52 раза, покрытия ПР-НХ17СР4+18 % TiC в 1,79 раза, покрытия ПР-НХ17СР4+30 % TiC в 1,25 раза.

Таким образом, теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что рациональным составом композитного покрытия, обеспечивающего наибольшую износостойкость, является содержание в нем 76,5 % порошка ПР-НХ17СР4 и 23,5 % TiC.

На рисунке 4.5 представлен поперечный шлиф с нанесенным композитным покрытием ПР-НХ17СР4 + 23,5 % TiC. Из рисунка 4.6 видна характерная слоистая структура покрытия, вызванная особенностью технологии ее нанесения.

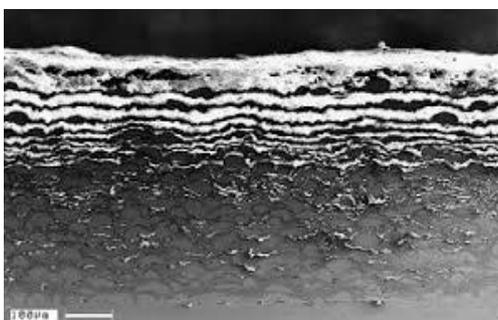


Рисунок 4.5 – Поперечный шлиф покрытия ПР-НХ17СР4+23,5 % TiC

Отслоения покрытий от основы на всех исследуемых образцах не наблюдалось. Дефекты нанесенного слоя в виде трещин и крупных пор на образцах не обнаружены. Микрошлиф характеризуется высокой плотностью, равномерностью структуры, низкой пористостью и высокой адгезией.

В разделе 5 «Технология восстановления плазменным напылением износостойких композитных покрытий» представлены основные положения технологического процесса по восстановлению рабочих поверхностей шнеков, а также оборудование для осуществления плазменного напыления композитных покрытий. Сделан вывод о том, что при планировании цехового участка для плазменного напыления композитных покрытий на рабочие поверхности шнека, необходимо использовать современное оборудование и новые функциональные порошки. Годовой экономический эффект восстановления шнека плазменным напылением составил 468 992,4 у.е. Период возврата инвестиций при этом составит 1,258 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Нанесение композитных покрытий плазменным напылением на изношенные поверхности детали с целью ее восстановления и увеличения ресурса эксплуатации представляет научный и практический интерес в области восстановления транспортной техники и специального оборудования АПК.

2. Разработана установка для нанесения композитных материалов на поверхности деталей плазменным напылением, обеспечивающая высокую

точность перемещения плазмотрона относительно восстанавливаемой поверхности детали.

3. Получены аналитические зависимости кинематических режимов плазменного напыления от геометрических особенностей поверхностей шнека, толщины формируемого композитного покрытия и температуры нагрева рабочих поверхностей. Также получены аналитические зависимости определения величины смещения изотермы плавления относительно изотермы контакта. Разработаны программные продукты для автоматизации расчетов параметров плазменного напыления поверхностей деталей машин.

4. Теоретически обоснован и экспериментально доказан новый состав композитного материала: карбид титана фракцией 63-80 мкм – 23,5 %, порошок ПР-НХ17СР4 фракцией 40-64 мкм – 76,5 %, обеспечивающий высокую прочность сцепления покрытия с основой.

5. Определены технологические режимы плазменного напыления композитного покрытия 76,5 % ПР-НХ17СР4+23,5 % TiC для винтовой и цилиндрической поверхностей шнека при напряжении на дуге 260 В – сила тока дуги плазмотрона 233...248 А, дистанция напыления 81...83 мм, массовый расход напыляемого материала 0,4...0,5 г/с, скорость вращения детали 35...37 мин⁻¹ (для цилиндрической поверхности), подача 4...6 мм/об (для цилиндрической поверхности), скорость перемещения плазмотрона 3...7 мм/мин (для винтовой поверхности), объемный расход плазмообразующего газа 0,8...1,8 л/с.

6. Экспериментальные исследования подтвердили корректность теоретических положений, разработанных в диссертационной работе. Получены регрессионные модели зависимости прочности сцепления покрытия с основой от размера и концентрации наполнителя композитного материала напыления. Также получены регрессионные модели зависимости прочности сцепления покрытия с основой и твердости покрытия от технологических режимов напыления рабочих поверхностей шнека.

7. Экспериментально установлено, что износостойкость полученного композитного покрытия в 2,52 раза превосходит упрочняющий слой легированного покрытия из порошка ПР-НХ17СР4 и в 3,39 раза поверхностный слой детали из стали 20Х без функционального покрытия. Микротвердость композитного покрытия 76,5 % ПР-НХ17СР4+23,5 %TiC в 1,4 раза выше, чем микротвердость легированных покрытий ПР-НХ17СР4+TiC и в 1,7 раза выше, чем микротвердость стандартных покрытий ПР-НХ17СР4.

8. Разработаны технология и состав композитного материала для восстановления изношенных поверхностей шнека транспортирующего конвейера АПК. Технология и состав композитного материала внедрены в ООО «ИНОКС РЕМ» и ООО «Совтех». Годовой экономический эффект восстановления и упрочнения шнека составил 468 992,4 у.е. Период возврата инвестиций составит 1,258 года при программе восстановления 1534 шнека в год.

9. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанную технологию восстановления и состав композитного материала для восстановления изношенных поверхностей шнеков таких конвейеров, как У13-БКШ, БКВ, УКВ 1 L10, УКВ, СВТ, КВЦ300, У9-УКВ, которые весьма активно используют-

ся на предприятиях АПК.

10. Перспективными направлениями дальнейшей разработки темы являются: исследование особенностей распространения нестационарных волн при формировании композитных покрытий плазменным напылением, разработка технологии размерного нанесения покрытия при восстановлении контактируемых поверхностей высокоресурсных деталей АПК, а также изучение наполнителей композитных материалов с целью расширения спектра их возможного использования при восстановлении деталей машин.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Sharifullin S.N. Calculation of parameters of particles in a plasma jet and modeling of kinematic models of spraying of wear resistant material / S.N. Sharifullin, G.I. Trifonov, I.N. Vyachina // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2018. Т. 1058. (012047). DOI: 10.1088/1742.

2. Trifonov G.I. Estimation of a Heat Distribution in a Part Plasma Coating Process / G.I. Trifonov, S.Yu. Zhachkin, M.N. Krasnova, N.A. Penkov // *International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy (TPCASE 2018)*, ISBN: 978-1-60595-617-6, 2018. – pp. 298–301.

3. Sharifullin S.N. Modeling of the influence of non-stationary waves in three-component medium in the formation of a plasma jet / S.N. Sharifullin, S.Yu. Zhachkin, G.I. Trifonov // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. Т. 1328. (012098). DOI: 10.1088/1742-6596/1328/1/012098.

4. Zhachkin S.Yu. Investigation and prediction of adhesion strength of plasma coatings by mathematical modeling of deposition parameters / S.Yu. Zhachkin, G.I. Trifonov, N.A. Penkov // *ICMTMTE. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 709 (2020) 022017. DOI:10.1088/1757-899X/709/2/0220172.

5. Жачкин С.Ю. Повышение надежности контактных поверхностей подъемного механизма путем комбинированной плазменной обработки / С.Ю. Жачкин, М.Н. Краснова, Н.А. Пеньков, Г.И. Трифонов // *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*. № 1, 2017.– С. 140–145.

6. Жачкин С.Ю. Применение технологии плазменного напыления для повышения эксплуатационной надежности сельхозмашин / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, Г.И. Трифонов // *Наука в Центральной России*. № 4 (28), 2017. – С. 131–136.

7. Жачкин С.Ю. Моделирование кинематики плазменного напыления на сложнопрофильные поверхности / С.Ю. Жачкин, М.Н. Краснова, Н.А. Пеньков, Г.И. Трифонов // *Труды ГОСНИТИ*. Т. 128, 2017. – С. 133–139.

8. Трифонов Г.И. Оценка интенсивности абразивного износа плазменного покрытия / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин, С.Н. Шарифуллин // *Ремонт, восстановление, модернизация*. № 10, 2018. – С. 41–43.

9. Жачкин С.Ю. Влияние кинематики движения инструмента на формирование износостойкого покрытия / С.Ю. Жачкин, М.Н. Краснова, Г.И. Трифонов, Н.А. Пеньков // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. Т. 14. № 5, 2018. – С. 142–147.

10. Трифонов Г.И. Математическое моделирование процессов плазменного напыления покрытий трехкомпонентных сред / Г.И. Трифонов, В.С. Поленов, С.Ю. Жачкин // Современные наукоемкие технологии. № 0, 2018. – С. 131–136.

11. Жачкин С.Ю. Анализ износостойкости функционального покрытия в условиях абразивного изнашивания сложнопрофильной детали трения / С.Ю. Жачкин, Е.В. Пухов, Г.И. Трифонов, Я.В. Комаров, К.В. Загоруйко // Вестник воронежского государственного аграрного университета. Процессы и машины агроинженерных систем. Т. 12. № 3 (62), 2019. – С. 32–40.

12. Жачкин С.Ю. К вопросу о математическом моделировании процесса плазменного напыления при восстановлении деталей АПК / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов, Н.А. Пеньков, А.В. Бирюков // Упрочняющие технологии и покрытия. № 4 (196), 2021. – С. 162–165.

Публикации в материалах конференций, научных журналах и сборниках научных трудов

13. Трифонов Г.И. Моделирование тепловых процессов в композиции «покрытие – основа» при плазменном напылении / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин // Приложение к журналу. Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов. Т. 23. № 123, 2018. – С. 531–534.

14. Трифонов Г.И. Применение карбида титана в технологии плазменного напыления с целью получения износостойкого покрытия / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин, О.А. Сидоркин // Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 115 годовщине со дня рождения профессора Харитончика Ефима Мироновича. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – С. 177–183.

15. Трифонов Г.И. Толщина покрытия детали при плазменном напылении / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин // Научно-практический журнал «Современные материалы, техника и технологии». № 1 (16), 2018. – С. 77–82.

16. Трифонов Г.И. Оценка износа сложнопрофильной детали после плазменного напыления / Г.И. Трифонов // Научно-практический журнал «Современные материалы, техника и технологии». №1 (22), 2019. – С. 51–56.

17. Жачкин С.Ю. Исследование качественно-точностных характеристик функциональных покрытий плазменного напыления / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов // Научные труды VI Межд. научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». М.: ИМАШ РАН, 2019. – С. 165–167.

18. Трифонов Г.И. Установка для нанесения композитных покрытий на сложнопрофильные поверхности деталей / Г.И. Трифонов, Н.А. Пеньков // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: сборник научных статей XV международной научно-практической конференции. Ставрополь: АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та, 2019. – С. 453–460.

19. Трифонов Г.И. Разработка системы автоматизированного проектирования нанесения функциональных покрытий / Г.И. Трифонов // Журнал «Механическое оборудование металлургических заводов». № 2 (15), 2020. – С. 43–49.

20. Жачкин С.Ю. Влияние геометрии поверхностей деталей машин агропромышленного комплекса на остаточные напряжения композитных покрытий плазменного напыления / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов // Проблемы современной аг-

рарной науки: материалы междунар. науч. конф. Отв. за вып. В.Л. Бопп, Ж.Н. Шмелева; Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2021. – С. 151–155.

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

21. Патент № 2762082 Российская Федерация, МПК В05В 13/04, В23К 10/00, В23К 9/04, С23С 4/134, С23С 14/54. Установка для нанесения композитных материалов на поверхности деталей различной конфигурации: № 2020141243; заявл. 14.12.2020; опубл. 15.12.2021 / Трифонов Г.И., Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил» Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации. – 11 с.

22. Патент № 2702994 Российская Федерация, МПК G01N 3/56. Машина для испытания деталей на абразивный износ: № 2018140144; заявл. 14.11.2018; опубл. 15.10.2019 / Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Пеньков Н.А.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил» Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации. – 6 с.

23. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2017663563. Расчет кинематических режимов и параметров плазменного напыления: № 2017618902; заявл. 29.08.2017; опубл. 7.12.2017 / Трифонов Г.И., Жачкин С.Ю.; заявитель и патентообладатель Трифонов Григорий Игоревич.

24. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018663842. Программа по расчету параметров плазменного напыления для винтовой поверхности детали: № 2018661447; заявл. 17.10.2018; опубл. 6.11.2018 / Трифонов Г.И., Жачкин С.Ю., Лазарев С.В.; заявитель и патентообладатель Трифонов Григорий Игоревич.

25. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2020663369. Моделирование скоростей распространения упругих волн при плазменном напылении функциональных покрытий: № 2020660744; заявл. 21.09.2021; опубл. 27.10.2021 / Трифонов Г.И., Жачкин С.Ю., Михальченко А.В.; заявитель и патентообладатель Трифонов Григорий Игоревич.

Просим принять участие в работе диссертационного совета Д 220.010.04 или выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, ученому секретарю Афоничеву Д.Н. Телефоны: (473) 224-39-39; 8-915-546-89-67; e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Подписано в печать 11.03.2022 г. Формат 60x80¹/₁₆. Бумага кн.-журн.

П.л. 1,0. Гарнитура Таймс. Тираж 100 экз. Заказ № 22801.

Типография ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. 394087, Воронеж, ул. Мичурина, 1.