

На правах рукописи



Пеньков Никита Алексеевич

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГИДРОЦИЛИНДРОВ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ
РАЗМЕРНЫМ КОМПОЗИЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ
НА ОСНОВЕ ХРОМА**

Специальность 05.20.03 – Технологии и средства технического
обслуживания в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Мичуринск-наукоград РФ, 2022

Работа выполнена в федеральном государственном казенном военном образовательном учреждении 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 и федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ»).

Научный консультант: доктор технических наук, профессор, академик РАН, заслуженный деятель науки и техники
Завражнов Анатолий Иванович

Официальные оппоненты: **Астахов Михаил Владимирович**, доктор технических наук, профессор, Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра «Колесные машины и прикладная механика», профессор
Величко Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева», кафедра «Технический сервис машин», профессор
Астанин Владимир Константинович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», кафедра «Эксплуатация транспортных и технологических машин», профессор

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет»

Защита состоится 28 апреля 2022 года в 10 часов на заседании объединённого диссертационного совета Д 999.179.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» по адресу: 393760, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101, корпус 1, зал заседаний диссертационных советов, тел/факс (47545) 3-88-13, доб. 3-82, E-mail: dissov@mgau.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ и на сайте www.mgau.ru, с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации www.vak.ed.gov.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, с указанием индекса, почтового адреса, телефона, электронной почты и сайта организации, фамилии, имени, отчества лица, подготовившего отзыв, просим направлять учёному секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Николай Владимирович Михеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современных условиях рыночной экономики повышаются требования к точности и надежности машин и оборудования в агропромышленном комплексе. Для проведения ремонтно-восстановительных работ вышедших из строя узлов и агрегатов требуются значительные материальные и трудовые ресурсы, что особенно актуально при эксплуатации техники импортного производства.

Одной из наиболее распространенных неисправностей, являющейся причиной выхода силовых гидравлических узлов из строя является появление течи по поверхностному слою покрытия. Известные технологические приемы дают возможность повысить герметичность хромовых покрытий. Однако они не позволяют решить проблему герметичности износостойких хромовых покрытий при восстановлении изношенных деталей с толщиной наносимого покрытия свыше 100 мкм на сторону, что характерно для ремонтного производства. Причиной этому служит большая толщина наносимого покрытия, в котором возникают значительные растягивающие напряжения, появляющиеся вследствие послойного наложения микроканалов, служащих концентраторами напряжений и приводящих к появлению сквозных трещин в покрытии.

Холодные методы электрохимического восстановления, как показывает практика, способны обеспечить необходимую точность поверхности при изготовлении и ремонте деталей. Для обеспечения необходимых эксплуатационных свойств силовых систем гидропривода сельскохозяйственной техники в современном производстве используют гальваническое хромирование и железнение. Указанные методы лишены таких недостатков, как температурные напряжения и деформации, вызванные механической обработкой, присущие термическим и механическим способам. К гальваническим покрытиям, наносимым на силовые гидравлические узлы, предъявляют ряд требований: высокая степень адгезии, наличие или отсутствие пор в покрытии (в зависимости от условий работы детали), низкая шероховатость поверхности. В ремонтном производстве важное значение имеет минимизация механической обработки восстанавливаемой поверхности до и после её восстановления. Это объясняется трудоемкостью проведения таких операций, а также созданием растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое.

В настоящий момент устранить механическую обработку покрытий и деталей при нанесении герметичного осадка существующими на сегодняшний момент методами крайне затруднительно. Это связано с несколькими причинами. Во-первых, финишная механическая обработка нужна для придания внешнему слою покрытия заданных проектом свойств. Во-вторых, восстанавливаемые детали не должны иметь локальных зон повышенного износа, что достигается механической обработкой до нанесения покрытия. Однако, механическая обработка приводит к возникновению в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений, повышению вероятности появления прижогов и шлифовочных трещин. Подобные дефекты делают невозможным дальнейшее хромирование и эксплуатацию детали. С использованием гальваномеханических методов

возможно получение герметичных покрытий заданного качества лишь при хромировании новых деталей, что обусловлено возможностью нанесения покрытий небольшой толщины (до 100 мкм). Восстановление изношенных узлов и агрегатов требует осаждения хромосодержащих осадков большой толщины. В этом случае вероятность возникновения сквозных трещин в покрытии возрастает, что может привести в результате эксплуатации таких изделий к течи по хрому и выходу такого узла из строя.

В связи с этим назрела потребность в разработке метода холодного размерного нанесения гальванических покрытий на поверхности деталей, позволяющего получать герметичные износостойкие гальванические покрытия без механической обработки. Под размерным хромированием понимают нанесение покрытия, при котором его толщина и равномерность соответствуют допуску на изготовление детали, что позволяет исключить операции механической доводки. Метод должен отвечать нескольким принципиальным условиям: во-первых, обеспечивать необходимую толщину и равномерность герметичного покрытия; во-вторых, осуществлять восстановление локальных участков с разными скоростями в зависимости от степени их износа; в-третьих, получать заданные характеристики поверхностного слоя детали.

Степень разработанности темы.

Исследованиям в области ремонта силовой гидравлической аппаратуры техники сельскохозяйственного назначения посвящены работы: С.Ю. Жачкина, С.А. Величко, В.К. Астанина, И.Н. Кравченко, В.И. Лайнера, В.П. Лялякина, В.Ф. Молчанова, Р.С. Сайфуллина, С.Н. Шарифуллина, И.И. Габитова и др.

Большинство ученых при нанесении гальванических покрытий применяли механическую обработку детали перед началом процесса осаждения металла или покрытия после его осаждения. Однако перспективным представляется нанесение функциональных герметичных дисперсно-упрочненных гальванических покрытий, поскольку они позволяют отказаться от механической обработки детали как до нанесения покрытия, так и после него, а также создавать внутренние сжимающие напряжения в формируемом осадке, повышая износостойкость восстанавливаемых узлов. Влияние структуры формируемых композиционных покрытий на свойства гальванических осадков в настоящее время остаётся малоизученным и представляет большой научно-практический интерес.

В связи с вышеизложенным сформулирована и обоснована следующая **научная гипотеза:** упрочнение и восстановление поверхностей металлических деталей типа тел вращения размерным износостойким герметичным композиционным гальваническим покрытием без предварительного выравнивания припуска и финишной механической обработки.

Цель работы: повышение надежности и качества восстановленных деталей гидроцилиндров сельскохозяйственной техники при одновременном сокращении затрат на технологическую подготовку производства.

В соответствии с вышеуказанной целью поставлены следующие основные **задачи работы:**

1. Изучить закономерности формообразования слоя покрытия в зависимости от степени износа различных участков поверхности и проанализировать

существующие процессы размерного наращивания металла на детали методом гальванического осаждения.

2. Выяснить границы возможной концентрации наполнителя в покрытии, позволяющего получать гальванические защитные слои заданного качества. Теоретически обосновать возможность получения композиционных покрытий со сжимающими остаточными напряжениями.

3. Определить закономерности управления точностью обработки, формирования шероховатости поверхности, границы возможного увеличения производительности процесса при нанесении композиционных гальванических покрытий. Выработать технологические рекомендации по применению метода нанесения дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий (ДУГКП) для различных типов конструкционных материалов.

4. Установить зависимость роста толщины покрытия гальванического композиционного осадка от режимных параметров его нанесения и разработать технологические рекомендации по нанесению покрытий требуемого качества с использованием разработанного метода. Исследовать влияние параметров осаждения композиционных покрытий на их физико-механические и эксплуатационные характеристики.

5. Разработать состав композиционного гальванического покрытия базового слоя с включениями карбида титана и оксида алюминия, служащего для устранения износа рабочих поверхностей деталей, и финишного слоя, непосредственно контактирующего с рабочими поверхностями контртела (сопрягаемых деталей) на основе упрочненной хромовой матрицы с включениями дисульфида молибдена, который введен с целью снижения хрупкости покрытия и коэффициента трения.

6. Обосновать рациональные параметры оборудования, средств технологического оснащения для осуществления предлагаемого метода.

7. Разработать технологию применения метода холодного гальванического наращивания композиционных покрытий в производстве силовых гидравлических узлов сельскохозяйственной техники и оценить ее эффективность.

Объект исследований. Процесс получения размерных износостойких дисперсно-упрочненных композиционных покрытий на основе хрома при восстановлении и упрочнении деталей силовой гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники.

Предмет исследований. Закономерности влияния режимных параметров осажденных покрытий, типа и состава композиции на повышение надежности и качества восстановления силовых гидроцилиндров сельскохозяйственной техники.

Научная новизна работы:

1. Предложено новое направление холодного восстановления профиля изношенных поверхностей с локальным выравниванием припуска.

2. Разработаны научные основы процесса нанесения размерного дисперсно-упрочненного композиционного гальванического покрытия на основе хрома со сжимающими остаточными напряжениями.

3. Подтверждено повышение физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий, наносимых разработанным методом, за счет внедрения мелкодисперсного наполнителя в гальваническую матрицу с последующим

последующим упрочнением наносимого слоя инструментом, работающим по методу обкатки, что исключает образование концентраторов напряжений.

4. Теоретически и экспериментально обоснованы и получены рациональные технологические режимы нанесения дисперсно-упрочненных композиционных гальванических хромовых покрытий заданного качества и требуемой толщины.

5. Определены закономерности взаимосвязей режимов осаждения композиционных гальванических хромовых покрытий с их физико-механическими свойствами.

6. Определены рациональные параметры оборудования, средств технологического оснащения для осуществления предлагаемого метода.

Практическая значимость работы заключается:

1. В разработке нового способа осаждения функциональных герметичных гальванических покрытий, позволяющего решать крупную народно-хозяйственную проблему повышения надёжности силовых гидравлических устройств холодным восстановлением силовых деталей гидравлических узлов с получением эксплуатационных характеристик не ниже, чем у новых изделий, и в выявлении технологических возможностей использования нового метода. Это продляет срок эксплуатации восстановленных деталей, снижает простои и приносит значительную прибыль народному хозяйству.

2. В разработке нового инструмента, необходимого для реализации предлагаемого способа.

3. В разработке методики проектирования технологических процессов, на основе которой создано технологическое оснащение для реализации метода нанесения размерных износостойких герметичных композиционных покрытий на основе хромовой матрицы инструментом из многофазного композиционного материала в промышленности, позволяющее значительно расширить область применения гальванических покрытий в сельхозмашиностроении.

Методология и методика исследования.

Теоретические исследования проведены с использованием методов механико-математического моделирования напряженно-деформированного состояния. Они базируются на основных положениях механики сплошных сред, электродинамики и технологии машиностроения. Построение математической модели и оптимизация уравнений для определения режимов обработки проведены на основе теории вероятности, математической статистики и теории оптимизации.

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием современных приборов и установок. Спекание инструмента проводили в вакуумно-компрессорной печи MEAPFORNI. Полученные инструментальные заготовки шлифовали на плоскошлифовальном станке с ЧПУ АВА-S-FPE-60-30. Испытания наносимых покрытий на герметичность проводили на гидростенде № ИГ032. Контрольное измерение остаточных напряжений в них осуществляли на рентгеноструктурном дифрактометре ДРОН-3. Измерение толщины наносимого покрытия проводили при помощи микроскопа МИМ-8. Шероховатость поверхности определяли на профилографе-профилометре модели 252 и контролировали на профилометре модели 283. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3. Испытания износостойкости проводили на модернизированной машине

трения МИ-1М. Состав полученных покрытий проверяли с использованием атомно-эмиссионного спектрометра «Искролайн-300». При эксплуатационных испытаниях использовалась сельскохозяйственная техника, выполняющая различные виды работ. Экспериментальные данные обрабатывались с помощью программы Statistica, графические построения получаемых зависимостей проводились с использованием программы MathCad.

Основные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

- метод холодного восстановления профиля изношенных поверхностей с локальным выравниванием припуска;
- научные основы процесса нанесения размерного дисперсно-упрочненного композиционного гальванического покрытия на основе хрома со сжимающими остаточными напряжениями;
- зависимости физико-механических и эксплуатационных свойств композиционных покрытий от режимов их нанесения, размеров и количественного состава наполнителя;
- технологические показатели процесса, зависящие от режимов нанесения размерных износостойких герметичных дисперсно-упрочненных композиционных гальванических покрытий на основе хрома;
- закономерности взаимосвязей режимов осаждения композиционных гальванических хромовых покрытий с их физико-механическими свойствами;
- параметры оборудования и средства технологического оснащения для осуществления предлагаемого метода.

Апробация. Материалы диссертации заслушаны, обсуждены и одобрены на международных научно-практических конференциях ВУНЦ ВВС «ВВА» (2009-2021 гг.), ВГТУ (2010, 2016, 2017, 2018, 2021 гг.), ВИМ (2016, 2018, 2019 гг.), ВИВТ (2013 г.), ВГАУ (2017, 2018, 2019, 2020 гг.), Тамбовский ГТУ (2017 г.), КНИТУ-КАИ (2018 г.), МАИ (2019 г.), Ставропольский ГАУ (2019 г.).

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 48 научных работах, в том числе 20 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 14 статей в изданиях, включенных в базы Web of Science, Scopus и Agris, 3 патента РФ на изобретения. Общий объем публикаций – 115,6 печ. л., из которых 61,4 печ. л. принадлежит соискателю.

Автор выражает глубокую благодарность научному консультанту академику РАН, профессору А.И. Завражнову за оказанную всестороннюю помощь при подготовке диссертации, а также академику РАПК, профессору С.Ю. Жачкину, профессору М.А. Артёмову, кандидатам технических наук К.Ч. Колбая, О.А. Сидоркину и инженеру Г.В. Кудрявцеву за оказанную помощь в проведении исследований и подготовке диссертации.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем 388 страниц, в том числе приложений на 53 страницах, 131 рисунков, 24 таблиц. Список литературы содержит 192 наименования, в том числе 23 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Дана общая характеристика проблемы, обоснована актуальность работы, изложены результаты исследований и научные положения, выносимые на защиту.

Раздел 1. «СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ».

Современное сельхозмашиностроение предъявляет высокие требования к силовым агрегатам и гидрорегулирующей аппаратуре. Такого рода детали подвергаются нанесению холодных размерных гальванических покрытий при их изготовлении и ремонте. В этом случае обычно поступают следующим образом: детали покрываются гальваническим покрытием заранее завышенной толщины, а затем посредством механической обработки доводятся до размеров, заданных чертежом с вполне определенной шероховатостью. Такой подход заставляет столкнуться с двумя техническими проблемами:

1. механическая обработка покрытий высокой толщины является сложной технологической задачей со значительной степенью брака;

2. дефекты поверхности, подвергаемой нанесению покрытий, делают расстояние от анода до внешней поверхности детали различной в разных точках, что негативно сказывается на качестве получаемых осадков.

Преимущество осаждения хромосодержащих покрытий на рабочие поверхности деталей и восстановления деталей твердым хромированием заключается, прежде всего, в сочетании некоторых положительных свойств, которыми обладают гальванические хромовые покрытия. При выборе хромирования в качестве метода восстановления деталей часто за основу берут одно из его преимуществ, однако в каждом конкретном случае возможно сочетание нескольких положительных сторон процесса гальванического осаждения.

Нанесённые гальванические покрытия на основе хрома при восстановлении деталей позволяют использовать более дешевые материалы, в сравнении с теми, которые использовались бы при отсутствии хромирования. Довольно часто в этих случаях углеродистые стали используют вместо дорогих специальных. Экономия в этом случае проявляется не только в стоимости материала, но и в затратах на его обработку. Однако, значительный слой осажденного гальванического покрытия не позволяет полностью использовать его защитные свойства вследствие наличия разветвленной сетки трещин и пор, присущих хромированию износостойкими покрытиями.

В таблице 1 представлены результаты статистического анализа деталей, подвергаемых хромированию в сельскохозяйственном машиностроении.

Следует учитывать, что для деталей силовой гидравлической аппаратуры одним из центральных показателей, характеризующих качество восстановленной детали, является герметичность наносимых покрытий. При нанесении покрытий низкого качества есть риск получить распространенный дефект таких агрегатов – течь по хрому, которая проявляется в неконтролируемом падении давления при утечке рабочей жидкости из силовых цилиндров при исправных уплотнителях.

Достоинством износостойкого хромирования является способность восстанавливать заданный чертежом размер деталей. Для новых механизмов это актуально при ошибочном уменьшении размеров во время изготовления, а при восстановлении это позволяет устранять такие дефекты как конусность, эллипсность и локальные износы.

Таблица 1 – Нанесение хромосодержащих покрытий при производстве и ремонте деталей машин

Наименование машин	В процессе изготовления				При ремонте			
	1	2	Кол-во, %		1	2	Кол-во, %	
			3	4			3	4
Грузовые автомобили	40-50	50-100	30-40	60-70	60-80	180-850	90-95	5-10
Тракторы (гусеничные и колесные)	18-22	50-150	95-99	1-5	24-52	150-850	95-99	1-5
Сельскохозяйственные машины	10-12	100-300	95-99	1-5	12-17	150-850	95-99	1-5

Примечание: 1 – количество деталей; 2 – толщина покрытия, мкм; 3 – износостойких покрытий; 4 – декоративных покрытий.

Сущность процесса холодного гальванического наращивания хромосодержащих покрытий на детали с одновременным механическим воздействием на деталь заключается в наложении процессов гальванического осаждения покрытия и механической обработки его в процессе осаждения. Такие способы характеризуются высокой производительностью и возможностью получения покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками.

В современном машиностроении существует множество видов гальванического осаждения покрытий на детали машин.

Электрохимическое натирание покрытий.

Для получения покрытий заданного качества при нанесении гальванических покрытий их подвергают одновременной механической обработке мягким инструментом: кистью, тампоном. Процесс восстановления протекает в зоне контакта инструмента с деталью. Наличие гальванической ванны не обязательно.

Гальваномеханическая обработка с абразивным инструментом (ГМО).

Другим видом контактного нанесения хромовых покрытий на деталь является гальваномеханическое наращивание металла с использованием абразивного инструмента, активирующего поверхность катода. Этот процесс также называют гальваническим хонингованием.

ГМО с инструментом из керамики.

Отличительной особенностью данного метода является механическая обработка покрытия в процессе его осаждения с применением инструмента из минералокерамики ВОК-60 и В-3.

ГКО со скользящим инструментом.

Отличительной особенностью рассматриваемого метода является использование инструмента, обеспечивающего регулируемый массовый перенос наполнителя в осаждаемое покрытие. Это позволяет получить ряд преимуществ.

Во-первых, появляется возможность изменять скорость осаждения покрытия на различных участках восстанавливаемой поверхности детали, что позволяет устранять геометрические погрешности деталей такие как эллипсность, конусность и др., вызванные износом. При этом отпадает необходимость проводить механическую обработку детали как во время подготовки поверхности к нанесению покрытия, так и после процесса хромирования для придания ей требуемых проектной документацией свойств. Во-вторых, благодаря регулируемому внедрению инструментального материала в виде мелкодисперсных частиц в покрытие появляется возможность повысить его микротвердость и, как следствие, износостойчивость по сравнению с покрытиями, полученными по стандартной технологии или технологии гальваномеханической обработки с абразивным или керамическим инструментом.

Вместе с тем, в подавляющем большинстве проведенных ранее работ по нанесению композиционных покрытий на различные детали не исследовался вопрос обеспечения герметичности получаемых осадков. В существующих работах отсутствует теория и технология, обеспечивающие возможность получения беспористых осадков, что не позволяет избавиться от такого распространенного дефекта в силовых гидравлических узлах как течь по хрому. Также отсутствуют данные о возможности получения в таком покрытии сжимающих остаточных напряжений.

Отсутствуют работы, позволяющие произвести теоретические расчеты, дающие практические рекомендации по осаждению герметичных композиционных гальванических покрытий с необходимыми эксплуатационными свойствами. Это препятствует широкому распространению и применению указанной технологии в производстве.

Таким образом, анализ состояния вопроса выявил актуальность темы, позволил сформулировать цели и задачи настоящей работы.

Раздел 2. «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ ПОКРЫТИЙ».

Нанесение дисперсно-упрочнённых гальванических композиционных покрытий состоит из двух составляющих, энергии электрического поля, сформированного в межэлектродном промежутке и осуществляющего осаждение положительно заряженных ионов на катод и диффузии инструментального материала в покрытие. Размерное нанесение покрытий на поверхность детали возможно при условии строгого соответствия скорости главного движения шпинделя оборудования и плотности тока, обеспечиваемого электрооборудованием установки, сочетание которых определяет временные интервалы формирования локальных участков поверхности с обеспечением требуемых характеристик и качества наносимых покрытий.

Инструмент, используемый для механического воздействия на растущие слои осадка, представляет собой состав, основой которого является материал с явно выраженными диэлектрическими свойствами. Это позволило получить совершенно новую технологию нанесения композитных гальванических покрытий, которая, по сравнению с известными методами холодных нанесений покрытий,

имеет ряд преимуществ. Во-первых, метод обеспечивает разную скорость осаждения покрытия на различные участки обрабатываемой поверхности в зависимости от их износа, что позволяет устранять геометрические погрешности деталей, вызванные износом или дефектом изготовления, не прибегая к традиционной механической обработке деталей. Во-вторых, регулируемое внедрение инструментального материала в виде мелкодисперсных частиц позволяет повысить микротвердость и износостойчивость получаемого покрытия.

Взаимодействие инструмента с осаждаемым покрытием заключается в упруго-пластическом деформировании обрабатываемой поверхности прокатывающимся по ней выглаживателем, который обладает высокой твердостью, низким коэффициентом трения, высокой степенью чистоты поверхности.

В направлении главного движения прижатый к обрабатываемой поверхности с силой инструмент внедряется в нее на глубину $R_{зисх}$, что характерно для метода гальваноконтактного осаждения со скользящим инструментом, и при движении сглаживает исходные неровности (рисунок 1). Высота шероховатости в направлении скорости (продольная шероховатость) обычно значительно меньше, чем высота поперечной шероховатости (в направлении подачи). После прохода инструмента происходит частичное упругое восстановление поверхности $\Delta_{упр}$. Впереди инструмента образуется валик пластически деформированного металла, передняя поверхность инструмента нагружается гораздо больше, чем задняя. По этой причине, а также вследствие адгезионного взаимодействия между деталью и инструментом, в процессе обработки покрытия инструментом возникает тангенциальная составляющая силы взаимодействия, которая стремится развернуть инструмент. Это приводит к тому, что в технологической системе возникают вибрации, приводящие к значительным колебаниям силы прижима инструмента и, соответственно к переупрочнению покрытия. Это вызывает его отслоение и шелушение. Кроме этого при вибрации возникает вероятность разрушения инструмента и нарушается контроль над введением наполнителя второй фазы в покрытие, что также негативно сказывается на качестве осадка.

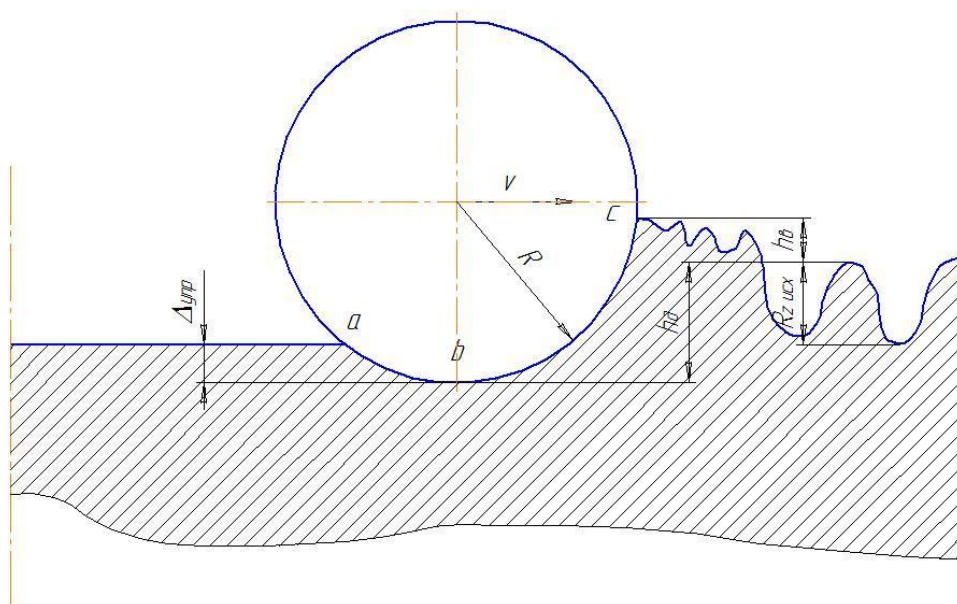


Рисунок 1 – Сглаживание исходных неровностей прокатным инструментом

С целью устранения негативных явлений, вызванных скольжением инструмента по поверхности, предлагается технология нанесения двухслойного композиционного электролитического дисперсно-упрочненного покрытия. Особенность нанесения каждого слоя заключается в периодической упруго-пластической деформации растущих микрослоев покрытия в процессе их осаждения посредством инструмента, совершающего движение качения с радиальным усилием на обрабатываемую поверхность. В этом случае инструментальный ролик внедряет частицы наполнителя в гальваническую матрицу, причем внедрение происходит не из-за трения скольжения, при котором неизбежны бороздки, получаемые от протаскивания твердых частиц наполнителя инструментом по осажденному покрытию, препятствующие получению герметичных осадков, а от трения качения, при котором внедряемые в гальваническую матрицу частицы остаются на месте внедрения и подвергаются зарастанию материалом матрицы.

Уровень прочности зависит от объемного содержания упрочняющей фазы, равномерности ее распределения, степени дисперсности и расстояния между частицами. Согласно гипотезе Орована, сопротивление сдвигу увеличивается с уменьшением расстояния между частицами. В силу этого для композитного материала можно записать:

$$\sigma = \frac{Gb}{l}, \quad (1)$$

где G – модуль сдвига; b – межатомное расстояние; l – расстояние между частицами.

Упрочнение частицами достигается в том случае, если они тормозят пластическую деформацию или разрушение материала. При дисперсном упрочнении металлической матрицы частицы блокируют скольжение в ней. При этом эффективность упрочнения зависит от расстояния между частицами D_p . Эта величина связана с диаметром частиц d_B и их объемной концентрацией V_B геометрическим соотношением:

$$D_p = \left(\frac{2d_B^2}{3V_B} \right)^{0,5} (1 - V_B) \quad (2)$$

Частицы фазы-упрочнителя окружены полями внутренних напряжений в матрице. Когда скользящая дислокация подходит достаточно близко к этим полям, она изгибается.

Наименьший радиус изгиба дислокации R под действием поля внутренних напряжений τ_i выражается формулой:

$$R = \frac{G_M b}{2\tau_i} \quad (3)$$

где G_M – модуль сдвига матрицы; b – вектор Бюргерса.

Так как $2R = D_p$, то напряжение, необходимое для выгибания дислокаций вокруг частиц, выражается равенством:

$$\tau_i = \frac{G_M b}{D_p} \quad (4)$$

Моделью деформирования наносимого композиционного покрытия инструментом будет контактная задача, рассматривающая взаимодействие бесконечно длинного цилиндра (инструментальной головки) с полупространством (обрабатываемая поверхность).

Вводится цилиндрическая система координат r, θ, z с соответствующими компонентами перемещения u, v, w . При этом перемещение v обращается в ноль, а остальные составляющие являются функциями r .

Вместо определяющих соотношений оказывается удобным ввести функцию напряжений φ . В этом случае функция напряжений справедлива для уравнения:

$$\nabla^2 \nabla^2 \varphi = 0 \quad (5)$$

А компоненты напряжения определяются:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right); & \sigma_\theta &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \nabla^2 \varphi - \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right); \\ \sigma_z &= \frac{\partial}{\partial z} \left((2-\nu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right); & \tau_{rz} &= \frac{\partial}{\partial r} \left((1-\nu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right); \end{aligned} \quad (6)$$

Взаимодействие инструментальной головки с обрабатываемой деталью определим как контакт цилиндрического тела (модель инструментального бруска) с бесконечным полупространством (модель восстанавливаемой поверхности). Радиус кривизны цилиндра – R_2 . В случае, когда между соприкасающимися телами не действует давление, касание происходит по прямой.

Расстояние mn можно с достаточной точностью представить в виде (рисунок 2):

$$z_2 = \frac{r^2}{2R_2}. \quad (7)$$

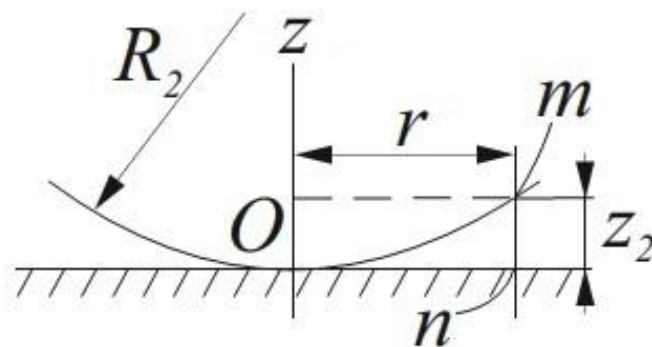


Рисунок 2 – Контакт цилиндра с полупространством

Отрезок On будет определять половину поверхности контакта инструментального бруска в рассматриваемом сечении. Принимая условие $r \ll R_2$, где r – радиус пятна контакта, можем воспользоваться приближением (7) для определения напряженно-деформированного состояния формируемого покрытия.

Пусть w_2 – перемещение точек поверхности детали в зоне контакта, вызванное местной деформацией в направлении z_2 для точки m цилиндра. Полагая, что в процессе местного сжатия плоскость касания остается неподвижной,

можно сказать, что точки m и n сблизятся друг с другом на некоторую величину α , а расстояние между ними станет: $\alpha - w_2$. Когда же они войдут в область контакта, то

$$\alpha - w_2 = z_2. \quad (8)$$

Теперь рассматривая местные деформации, давление инструмента на обрабатываемую поверхность q из соображений симметрии совпадет для обеих сторон относительно центральной точки контакта. Перемещения w_2 этой точки запишутся в виде:

$$\frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2} \iint q ds d\psi = \alpha - \frac{r^2}{2R_2}, \quad (9)$$

где E_2 – модуль упругости инструментальной головки, ν_2 – коэффициент Пуассона инструмента.

Максимальное давление, оказываемое инструментальной головкой на обрабатываемую поверхность определяется:

$$q_0 = \frac{2\sqrt{E_2 P}}{\pi \sqrt{R_2 H (1-\nu_2^2)}}, \quad (10)$$

где H – высота инструментальной головки, выполненной в форме цилиндра.

Напряжение σ_z , возникающее в точке зарождения пластичности, распределено по поверхности контакта цилиндра с поверхностью детали. Его можно получить, заменяя действие сосредоточенной силы P величиной $H dr q$. Тогда напряжение σ_z , вызываемое равномерной нагрузкой, будет:

$$\sigma_z = -\frac{3Hz^3 q}{2\pi} \int_{-a}^a \frac{dr}{\sqrt{(r^2 + z^2)^5}}, \quad (11)$$

где интегрирование ведется вдоль всей поверхности контакта, a – максимальный радиус пятна контакта. После интегрирования получим:

$$\sigma_r = \frac{Hq}{\pi} \cdot \frac{(1-2\nu) \sqrt{(a^2 + z^2)^3} (\sqrt{a^2 + z^2} - z) - a^4}{az \sqrt{a^2 + z^2}}. \quad (12)$$

Предполагая, что течение материала определяется условием пластичности Треска – Сен-Венана, определим точку зарождения пластической области на оси Oz . Компоненты напряжений в данном случае будут распределены следующим образом:

$$\sigma_z < \sigma_r < \sigma_\theta. \quad (13)$$

Условие пластичности примет вид:

$$\frac{(1-2\nu) Hq_0}{\pi} \cdot \frac{a^2 + z \sqrt{a^2 + z^2} - z^2}{az \sqrt{a^2 + z^2}} + \frac{Hq_0 a}{\pi} \cdot \frac{2a^2 + 3z^2}{z \sqrt{(a^2 + z^2)^3}} = k, \quad (14)$$

где k – предел пластичности формируемого покрытия.

Выражение, определяющее глубину зарождения пластической области, будет иметь вид:

$$\sqrt{z^2 (8.95 \cdot 10^{-7} + z^2)} (0.3z^2 + 2.68 \cdot 10^{-7}) = 0.3z^4 - 2.69 \cdot 10^{-6} z^2 - 1.84 \cdot 10^{-12}.$$

Полученное уравнение имеет один вещественный корень: $z=127$ мкм.

Установлено, что при определенном давлении инструмента в покрытии возникают пластические деформации. Причем граница пластической области зарождается не на поверхности покрытия, а на определенной глубине z , создавая разветвленную сетку трещин. Поэтому в процессе нанесения композиционного покрытия необходимо корректировать давление инструмента до получения необходимой степени упрочнения формируемых слоёв.

Предлагаемая концепция позволяет реализовать возможности процесса нанесения ДУГКП и получать детали с покрытиями при высокой производительности, а также физико-механическими и, как следствие, эксплуатационными свойствами, недостижимыми ни одним из известных методов получения покрытий.

При взаимодействии инструмента с деталью происходит контактирование шероховатой (инструмент) и волнистой (деталь) поверхностей. Инструмент представляет собой композицию оксида алюминия и карбида титана. Вследствие случайного расположения различных фаз композиционных материалов в инструменте их можно рассматривать как дополнительную шероховатость.

В этом случае относительное сближение ε поверхностей определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{R_{\max} - h}{R_{\max}}, \quad (15)$$

где R_{\max} – расстояние между линией выступов и линией впадин профиля обрабатываемой детали, h – расстояние от базовой поверхности до высоты покрытия после контакта с инструментом.

Относительная площадь сечения профиля:

$$t_p = \frac{A_s}{A_c}, \quad (16)$$

где A_s – сумма площадей микронеровностей на высоте h , A_c – контурная площадь некоторого заданного участка.

Относительная опорная длина профиля выше уровня средней линии может быть определена:

$$T_{p1} = t_m \left(\frac{pR_{\max}}{100R_m} \right)^{\left(\frac{t_m R_m - 1}{50R_a} \right)}, \quad (17)$$

где p – уровень сечения профиля от линии выступов (фиксированный уровень), мкм;

а для уровня ниже средней линии:

$$T_{p2} = 100 - t_m \left(\frac{R_{\max} (100 - p)}{100(R_{\max} - R_m)} \right)^{\left(\frac{50R_a - t_m R_m}{50R_a} \right)}, \quad (18)$$

где t_m – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии, мм; R_m – расстояние между линией выступов и средней линией, мм; R_a – расстояние сближения контактируемых тел, мм.

Зная относительную площадь сечения контактируемых поверхностей и учитывая опорную длину профиля, можно проводить корректировку усилий

прижима инструмента к обрабатываемой детали с учетом её истинной шероховатости, создавая требуемую степень упрочнения.

Раздел 3. «ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ».

Рассмотрена общая структурная схема проведения испытаний, методики исследований и статистической обработки экспериментальных данных.

Процесс создания инструментального ролика для получения ДУГКП предусматривал измельчение порошков оксида алюминия (Al_2O_3 ГОСТ 28818-90) и карбида титана (TiC ГОСТ 28377-89) до необходимого размера, приготовление смеси в необходимой пропорции, прессование заготовок из этих смесей и последующее их спекание, механическую обработку пластин, мойку.

Для получения ДУГКП применялся раствор окиси шестивалентного хрома. Покрытия осаждались в стандартном электролите хромирования, содержащем 200–250 г/л CrO_3 и 2,0–2,5 г/л H_2SO_4 .

Для воссоздания условий эксплуатации силовых элементов систем гидравлического привода сельскохозяйственной техники изготавливались образцы цилиндрической формы из стали 40Х (ГОСТ 4543-2016). Осаждение изучаемых покрытий проводилось на спроектированной и изготовленной экспериментальной установке (рисунок 3).

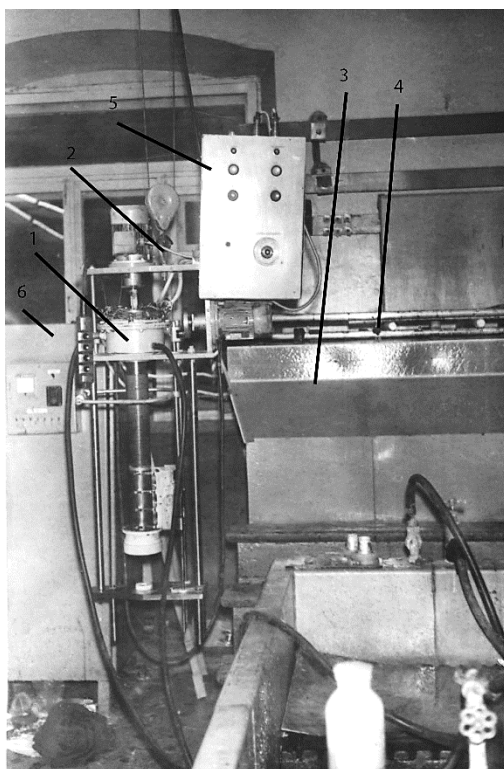


Рисунок 3 – Экспериментальная установка для нанесения композиционных дисперсно-упрочненных герметичных гальванических покрытий:

- 1 – инструментальная головка; 2 – рым-болт; 3 – бак для электролиза;
- 4 – фильтр для очистки воздуха; 5 – блок электроуправления; 6 – электродвигатели;
- 7 – планетарные редукторы; 8 – шпиндель установки

Осевые остаточные напряжения в хромовых покрытиях определялись по

ГОСТ Р 52728-2007 методом электротензометрирования при непрерывном стравливании напряженных слоев с исследуемой поверхности на специальной установке, которая предназначена для измерения относительных деформаций и состоит из тензометрического усилителя 8АНЧ-7М и самопишущего потенциометра КСП-4. Контрольное измерение остаточных напряжений осуществлялось согласно ГОСТ 9.302-88 на рентгеноструктурном дифрактометре ДРОН-3.

Толщину покрытия определяли согласно ГОСТ 9.302-88. Шероховатость определялась на профилографе-профилометре модели 252 и контролировалась на профилометре модели 283. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3. Металлографические исследования проводились на микроскопе МИМ-8.

Испытания износостойкости проводились на модернизированной машине трения МИ-1М по схеме «ролик-колодка» в соответствии с ГОСТ 23.224-86.

Состав полученных покрытий проверялся с использованием атомно-эмиссионного спектрометра «Искролайн-300».

Стендовые испытания гидроцилиндров, обработанных по рассматриваемой технологии, проводились согласно методике, изложенной в ГОСТ 18464-96, ГОСТ 16514-96 и ГОСТ 27.502-83 на стенде СГЦ-ПФГУХ-190/250-34/4-7,5/2,2.

Эксплуатационные испытания гидроцилиндров проводили в войсковой части 23449 на бульдозерах ДЗ-42 и на тракторах ДТ-75 в ООО «ИНОКС РЕМ» на территории сельхозугодий Воронежской области.

Анализ и обработку экспериментальных данных для оценки эксплуатационной надежности проводили в соответствии с ГОСТ 27.301-95.

Раздел 4. «РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ».

Для осаждения герметичных покрытий хром привлекателен в качестве металлической матрицы по целому ряду причин: в том числе хорошей износостойкости и термостойкости.

Среди материалов, используемых в качестве второй фазы, с целью повышения микротвердости наращенного слоя, наиболее используемыми являются Al_2O_3 , TiO_2 , TiC , WC . В работе в качестве наполнителя был выбран порошок Al_2O_3 и TiC .

Одним из самых важных параметров осаждения является размер включаемых в покрытие частиц: чем меньше их размеры, тем равномернее они распределены по матрице, что обеспечивает более совершенные физические свойства покрытия.

Поверхность образцов, получаемых из электролита с добавлением неэлектропроводных частиц субмикронных размеров, к которым относится оксид алюминия, также является более сглаженной, но имеет более развитую трещиноватость по сравнению с композиционными электролитическими покрытиями с включениями электропроводных частиц.

Для покрытий, полученных в электролите, содержащем электропроводную дисперсную фазу, к которой можно отнести карбид титана, характерно наличие на поверхности образцов металлизированных частиц, причём с увеличением продолжительности времени процесса осаждения увеличение общего числа таких объектов заметно даже визуально.

Для определения рационального состава композиционных включений был реализован многофакторный эксперимент по центральному композиционному плану.

В результате расчета пошаговой множественной регрессии с применением пакета научных подпрограмм «Statistika» получено уравнение, отклик которого изображен на рисунке 4.

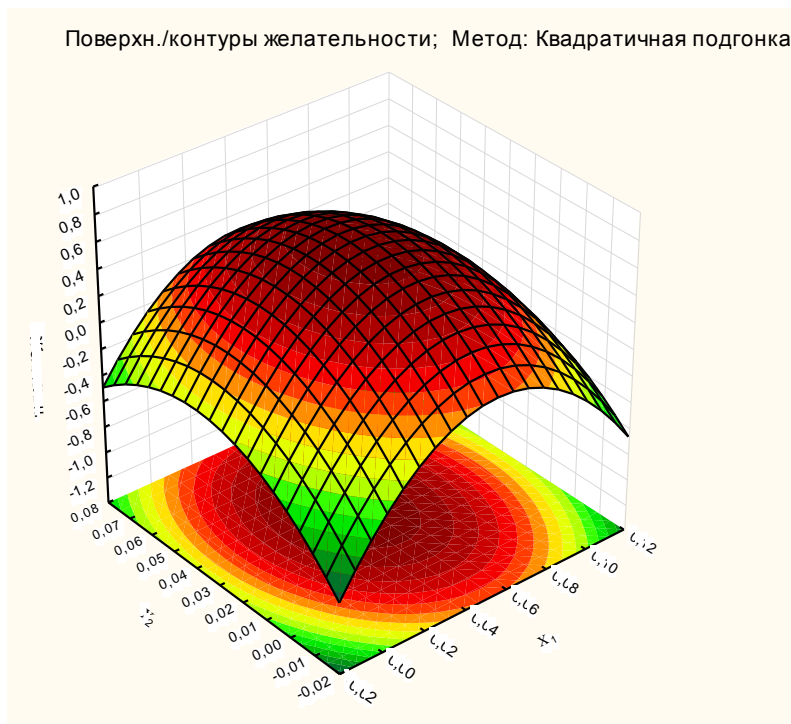


Рисунок 4 – Поверхность отклика для определения состава ДУГКП

Проведенные исследования позволили установить, что для композиционных покрытий на основе хрома определён рациональный состав композиции базового слоя: оксид алюминия – 5% по массе; карбид титана – 3% по массе; остальное – хромовая матрица. Композиционное гальваническое покрытие при этом составе имеет наиболее высокую микротвердость.

Рациональное содержание дисульфида молибдена при нанесении финишного слоя электролитического покрытия на основе хромовой матрицы, имеющего наибольшую микротвердость: дисперсность частиц – 0,9 мкм; концентрация – 2,5% по массе.

В связи с поставленной в работе задачей получения герметичных композиционных гальванических покрытий на основе хрома, необходимо определить режимы нанесения покрытия, при которых оно имеет сжимающие остаточные напряжения по величине не превосходящие предел прочности хромовой матрицы.

Для изучения влияния электролиза на остаточные напряжения получаемых покрытий применялось математическое планирование эксперимента. Исследовались образцы, прошедшие восстановление хромированием с толщиной покрытия 40–400 мкм. Характеристики плана эксперимента выбирались из условия полу-

чения беспористых хромовых покрытий со сжимающими остаточными напряжениями.

Для определения зависимости остаточных напряжений в покрытии от исследуемых факторов получено уравнение регрессии (19).

$$\begin{aligned} \sigma = & -138,11 + 6,04x_1 - 2,17x_2 - 17,32x_3 + 0,34x_4 - 0,01x_1x_2 - 0,49x_1x_3 - \\ & - 0,2x_2x_3 - 0,01x_1x_4 - 0,005x_2x_4 - 0,23x_3x_4 + 0,01x_1x_2x_3 + 0,0003x_1x_2x_4 + \\ & + 0,01x_1x_3x_4 + 0,005x_2x_3x_4 - 0,0003x_1x_2x_3x_4. \end{aligned} \quad (19)$$

Распределение остаточных напряжений в базовом слое покрытия в зависимости от плотности тока представлено на рисунке 5. Видно, что до плотности тока 10 кА/м^2 , напряжения удается держать сжимающими по всей толщине наносимого покрытия. Однако, двухкомпонентное гальваническое композиционное покрытие на основе хрома, при нанесении его по рассчитанным режимам, позволяет получать сжимающие остаточные напряжения в нем на протяжении всей толщины наносимого покрытия (графики 1, 2 на рисунке 5.). Результаты аналогичного исследования для финишного слоя представлены на рисунке 6.

В результате проведенных исследований основные параметры электролиза для нанесения как базового, так и финишного слоя следующие:

плотность тока (x_1) i , кА/м^2	8 – 20
температура электролита (x_2) t , $^\circ\text{C}$	45 – 65
давление инструмента (x_3) P , МПа	1,0 – 1,5
толщина покрытия (x_4) δ , мкм	40 – 400

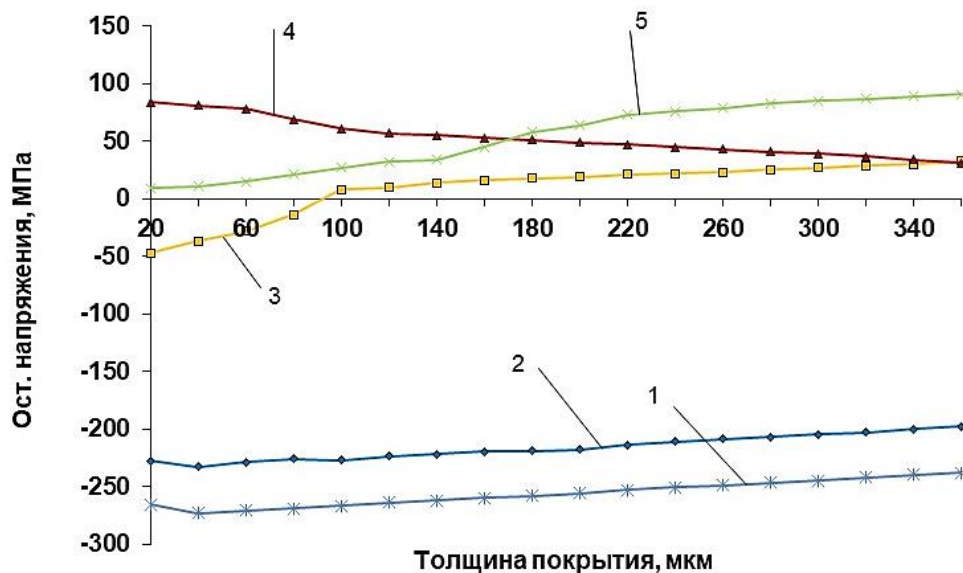


Рисунок 5. Зависимость остаточных напряжений от толщины двухкомпонентного композиционного покрытия на основе хрома (базовый слой) для различных плотностей тока:

- 1 – $i = 10 \text{ кА/м}^2$; $t = 65 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,5 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;
- 2 – $i = 12 \text{ кА/м}^2$; $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;
- 3 – $i = 14 \text{ кА/м}^2$; $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;
- 4 – $i = 18 \text{ кА/м}^2$; $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;
- 5 – $i = 30 \text{ кА/м}^2$; $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$.

Для определения рациональной производительности процесса получения герметичных ДУГКП на основе хрома проводился полный факторный эксперимент. Характеристики плана эксперимента выбирались из условий получения покрытий со сжимающими остаточными напряжениями. Все режимные параметры изменяли исходя из технологических рекомендаций по получению герметичных хромовых покрытий с максимальной производительностью процесса.

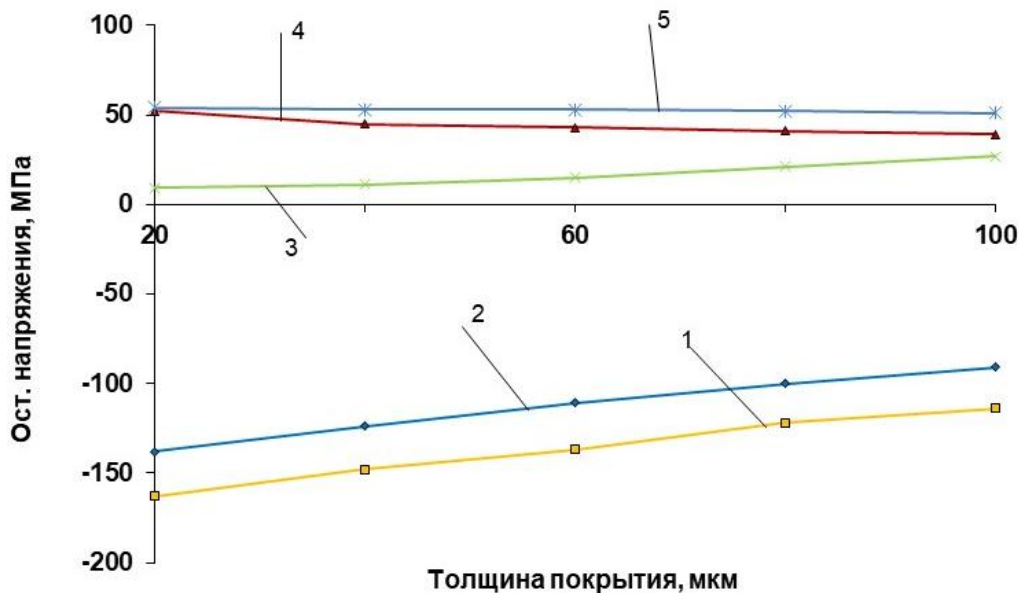


Рисунок 6 – Зависимость остаточных напряжений от толщины двухкомпонентного композиционного покрытия на основе хрома (финишный слой) для различных плотностей тока:

- 1 – $i = 10 \text{ кА/м}^2$; $t = 65 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,5 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;
- 2 – $i = 12 \text{ кА/м}^2$; $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;
- 3 – $i = 14 \text{ кА/м}^2$; $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;
- 4 – $i = 18 \text{ кА/м}^2$; $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;
- 5 – $i = 30 \text{ кА/м}^2$; $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$

В результате расчета пошаговой множественной регрессии с применением пакета научных подпрограмм «Statistika» получено уравнение, описывающее зависимость производительности процесса при нанесении базового слоя покрытия от исследуемых факторов:

$$v_{\phi} = 1,82 + 0,059 \cdot x_1 - 0,0076 \cdot x_2 - 0,016 \cdot x_3 \quad (20)$$

Аналогичные исследования проводились для определения производительности нанесения финишного слоя, что позволило получить соответствующую зависимость:

$$v_{\phi} = 2,691 + 0,077 \cdot x_1 - 0,016 \cdot x_2 - 0,324 \cdot x_3 + 0,005x_2x_3 \quad (21)$$

В результате проведенного экспериментального исследования было установлено, что скорость нанесения финишного слоя ДУГКП на основе хрома превышает аналогичный показатель при нанесении базового слоя покрытия в 1,27 раза.

Основываясь на полученных в ходе исследования данных, была построена графическая интерпретация аналитической зависимости качества получаемых ДУГКП в зависимости от параметров осаждения, которая представлена на рисунке 7. Видно, что основным показателем скорости роста осадка, включающим в себя параметры процесса осаждения покрытий является производительность процесса, а наиболее простым и наименее инерционным параметром, с точки зрения регулирования, является давление инструмента на осаждаемое покрытие. Графическая интерпретация, представленная на рис. 7, представляет собой области получения покрытий различного качества в зависимости от производительности процесса и давления инструмента.

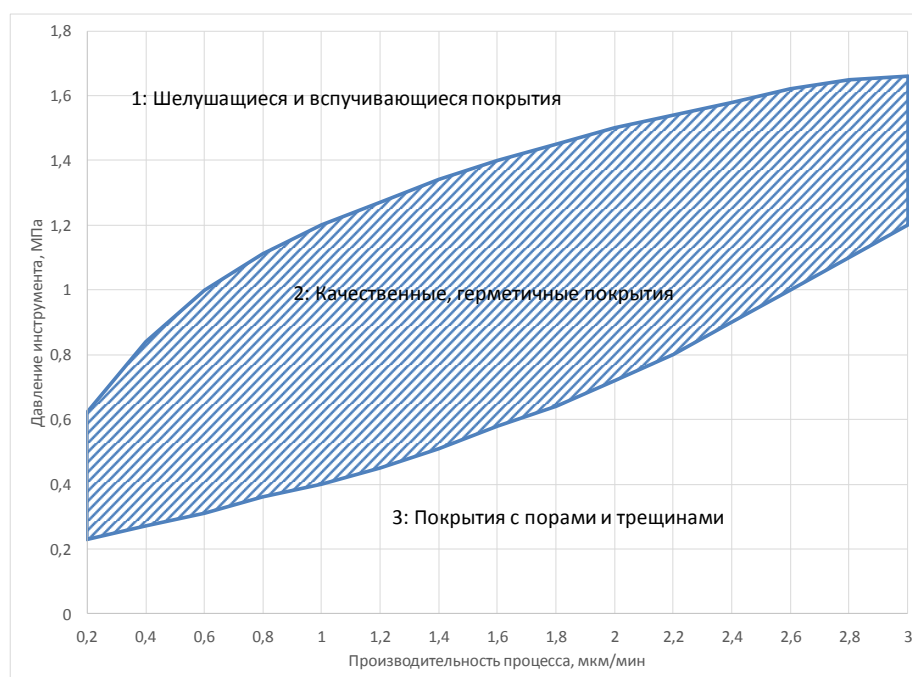


Рисунок 7. Области получения покрытий заданного качества

Для изучения влияния электролиза на шероховатость получаемых покрытий применялось математическое планирование эксперимента. Был реализован полный факторный эксперимент 2^3 . Характеристики плана эксперимента выбирались из условия получения беспористых хромовых покрытий со сжимающими остаточными напряжениями и минимальной шероховатостью восстановленной поверхности. Результаты проведенных исследований представлены на рисунке 8.

Проверка на практике показала, что с увеличением давления на обрабатываемую поверхность шероховатость ее значительно снижается и доходит до $R_a = 0,04$ мкм и менее.

Проведён ряд исследований, позволяющий судить о выравнивающей способности предлагаемого метода нанесения ДУГКП. Зная толщину покрытия (рисунок 9) и производительность процесса, рассчитанную для базового и финишного слоя по формулам (20) и (21), можно определить время, необходимое для нанесения покрытий требуемой толщины.

Для определения состава получаемых покрытий проводился анализ спектрограмм атомно-эмиссионного спектрометра «Искролайн-300». Это позволило

сделать вывод о том, что в композиционных покрытиях базового слоя из электролитов-суспензий и дисперсно-упрочненных композиционных покрытий на основе хрома присутствуют вводимые элементы второй фазы, а именно алюминий и титан. В финишном дисперсно-упрочненном композиционном покрытии на основе хрома присутствуют такие элементы как молибден и сера, отсутствующие в стандартном гальваническом хромовом покрытии и в базовом слое ДУГКП на основе хрома.

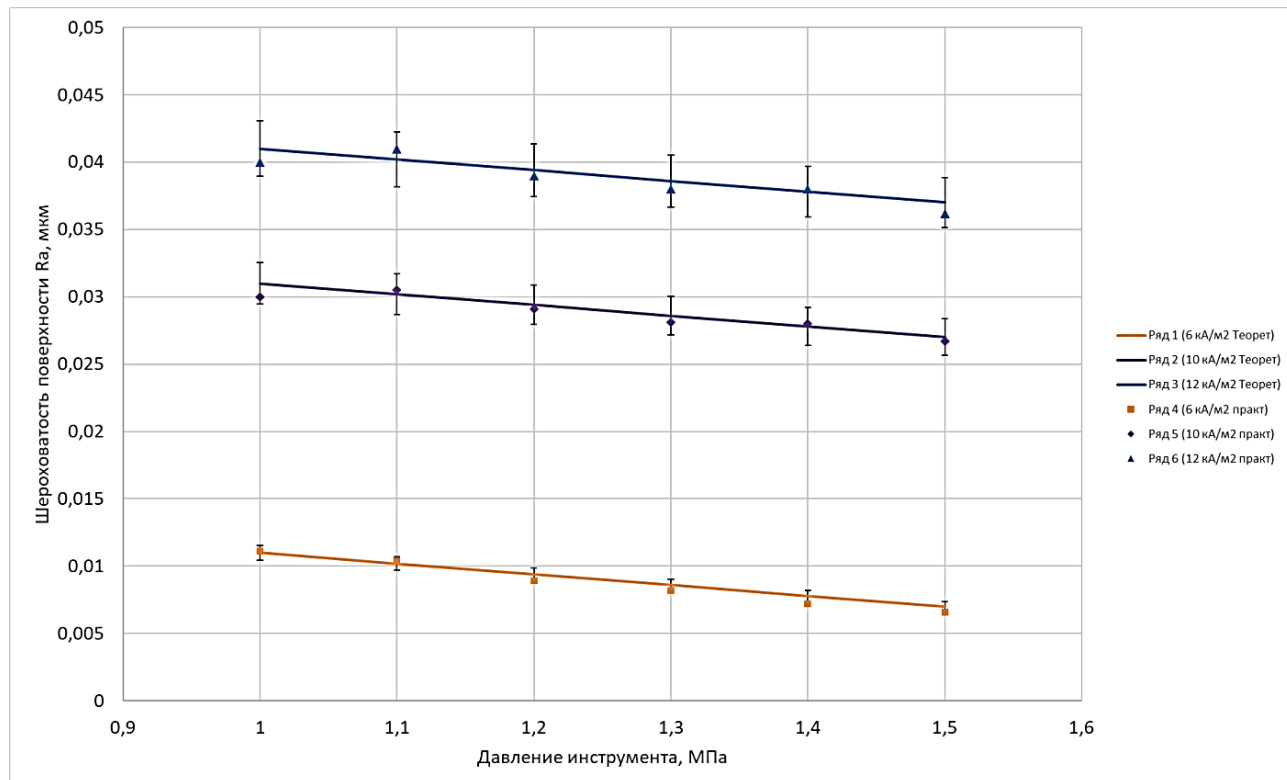


Рисунок 8. Зависимость шероховатости поверхности от давления инструмента при различных плотностях тока

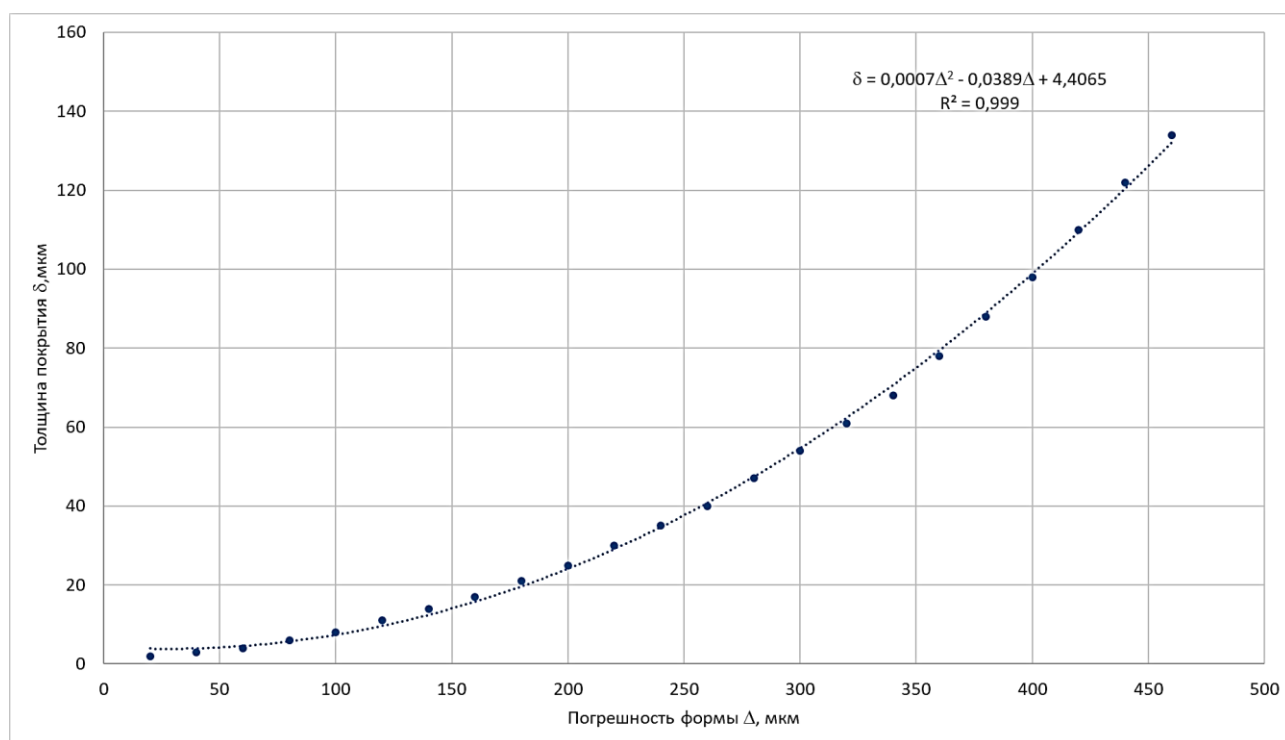


Рисунок 9. Зависимость минимальной толщины наносимого покрытия от устраняемой величины погрешности формы детали

Результаты количественного анализа состава получаемых покрытий представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Количественный состав покрытий

Элемент в покрытии	Содержание элемента в покрытии, %			
	Стандартный хром	Композиционный хром из электролита-суспензии	Дисперсно-упрочненное композиционное покрытие на основе хрома (базовый слой)	Дисперсно-упрочненное композиционное покрытие на основе хрома (финишный слой)
Cl	1,08	1,11	1,34	1,37
H	1,34	1,17	0,11	0,1
O	0,42	1,07	0,44	0,48
Mo	-	-	-	2,36
Ti	-	0,05	2,69	-
C	2,14	0,56	2,27	0,61
Cr	90,63	89,43	86,92	91,87
Fe	2,89	2,14	1,08	1,02
Al	-	2,85	4,57	-
S	-	-	-	0,14

Работоспособность узлов с гальваническими покрытиями в значительной мере зависит от их адгезионных свойств. С целью изучения влияния режимных параметров осаждения покрытия на его адгезию исследовались образцы с дисперсно-упрочненным композиционным покрытием на основе хрома для базового

и финишного слоев покрытия. Причем толщина базового слоя составляла 200 – 400 мкм, а финишного слоя 40 – 200 мкм.

Для изучения влияния электролиза на сцепляемость получаемых покрытий применялось математическое планирование эксперимента. Был реализован полный факторный эксперимент 2^3 . Характеристики плана эксперимента выбирались из условия получения беспористых хромовых покрытий со сжимающими остаточными напряжениями и минимальным наводороживанием стальной основы.

В результате расчета пошаговой множественной регрессии с применением пакета научных подпрограмм «Statistika» получено уравнение, описывающее зависимость адгезии базового слоя ДУГКП на основе хрома от исследуемых факторов:

$$\xi_6 = 92,14 - 2,42x_1 + 2,78x_2 - 1,15x_3 - 1,04x_1x_2 - 0,54x_1x_3 - 0,41x_2x_3 + 0,11x_1x_2x_3. \quad (22)$$

Экспериментальное исследование зависимости адгезии покрытия от его толщины представлено на рисунке 10. Построенные аппроксимирующие зависимости позволяют сделать вывод, что скорость уменьшения адгезии покрытия с увеличением его толщины при нанесении стандартного хромового покрытия в 5,7 раза выше, чем при нанесении ДУГКП на основе хрома.

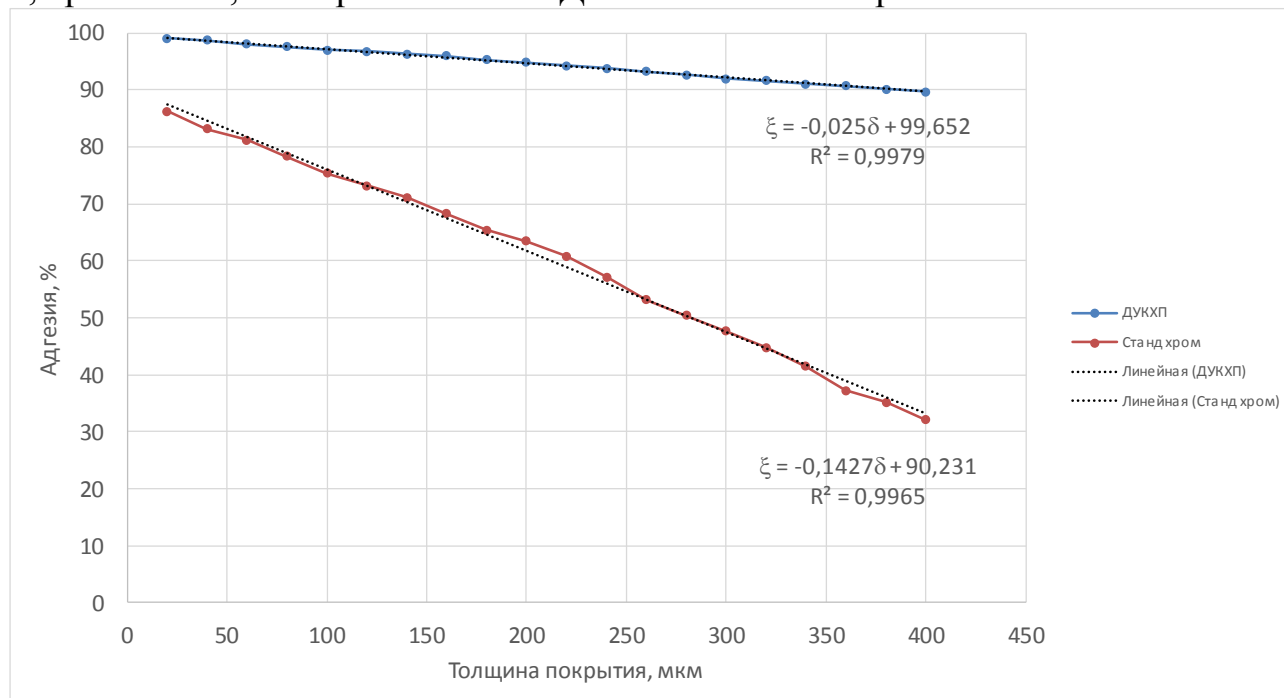


Рисунок 10 – Экспериментальная проверка качества адгезии композиционных покрытий

Дальнейшие исследования качества получаемых покрытий были направлены на изучение характера наводороживания обрабатываемой поверхности. Установлено, что величина наводороживания при нанесении ДУГКП меньше аналогичного показателя для ГМХ в 1,19 раза, а стандартного хромирования в 1,76 раза. В результате расчета пошаговой множественной регрессии с применением пакета научных подпрограмм «Statistika» получено уравнение, описывающее зависимость наводороживания стальной основы от исследуемых факторов:

$$\begin{aligned}
 H_z = & 268,76 - 21,596x_1 - 4,497x_2 - 266,169x_3 - 0,929x_4 + 0,371x_1x_2 + 22,305x_1x_3 + \\
 & + 0,08x_1x_4 + 4,406x_2x_3 + 0,016x_2x_4 + 0,922x_3x_4 - 0,373x_1x_2x_3 - 0,001x_1x_2x_4 - \\
 & - 0,079x_1x_3x_4 - 0,015x_2x_3x_4 + 0,001x_1x_2x_3x_4.
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

Одним из важнейших требований, предъявляемых к хромовым покрытиям силовых узлов гидропневмоагрегатов, является обеспечение их выдвигаемых механизмов герметичным покрытием. С целью проверки герметичности полученных покрытий испытания проводились на серийных гидравлических штоках одинакового типоразмера, восстановленных по серийной технологии (серия 1), по технологии нанесения ДУГКП на основе хрома на рекомендованных режимах (серия 2), по технологии нанесения ДУГКП на основе хрома на режимах получения пористых покрытий, обозначенных областью 3 на рисунке 7 (зона 3).

Результаты испытаний штоков на отсутствие пористости представлены в таблице 3.

Для испытаний на износостойчивость были взяты образцы с покрытиями, нанесенными следующими методами: по серийной технологии гальваническим хромированием (серия 1); по технологии гальваномеханического хромирования (серия 2); по технологии нанесения ДУГКП на основе хрома на режимах получения герметичных покрытий (серия 3); по технологии нанесения ДУГКП на основе хрома на режимах получения пористых покрытий (серия 4). Испытаниям на износостойкость подвергались детали с бронзовой поверхностью, как в наибольшей степени имитирующей трибологические свойства материала уплотнения силовых штоков гидроцилиндров. Одновременно истиралось несколько образцов. Мерой износостойчивости покрытия была определена толщина удаленного покрытия в единицу времени, выражаемая в мкм/мин. Характеристики образцов и нанесенных на них покрытий приведены в таблице 4.

Таблица 3 – Результаты испытаний штоков на герметичность

Номер серии штоков	Номер штока	Толщина покрытия, мкм	Время нанесения покрытия час.	Кол-во положений испытаний	Давление в системе МПа	Время испытания, мин	Результат испытания
Серия 1	КР-472	170	19,3	3	25	5	негермет.
	АН-245	170	19,3	3	25	5	негермет.
	ПС-341	160	18,6	3	25	5	негермет.
Серия 2	АН-281	170	1,41	3	25	5	гермет.
	КР-493	170	1,41	3	25	5	гермет.
	НП-146	180	1,5	3	25	5	гермет.
Серия 3	КР-388	170	1,68	3	25	5	негермет.
	АН-234	170	1,69	3	25	5	негермет.
	ПС-308	160	1,61	3	25	5	негермет.

Таблица 4 – Характеристики образцов с покрытиями

№ серии	Шероховатость Ra, мкм	Микротвердость HV, МПа	Толщина покрытия, мкм	Наличие сетки трещин в покрытии
Серия 1	0,1 – 0,16	9800 - 10500	190 – 210	присутствует
Серия 2	0,04 – 0,05	9800 - 10200	190 – 210	отсутствует

Серия 3	0,04 – 0,05	14310 - 14320	190 – 210	отсутствует
Серия 4	0,05 – 0,06	14306 - 14312	190 - 210	присутствует

При определении долговечности гидравлических узлов, испытывающих контактные воздействия трущихся деталей, важную роль играет величина сил трения, возникающих при работе системы силовой гидравлики сельскохозяйственной техники.

Для исследования коэффициента трения проводился регрессионный анализ, при котором применялось математическое планирование эксперимента. Исследовались образцы с ДУГКП на основе хрома, имеющие компонент второй фазы дисульфид молибдена. Толщина покрытия составляла 40–400 мкм. Образцы работали в паре со стальными деталями из легированной стали 40Х.

Получено регрессионное уравнение, описывающее зависимость коэффициента трения покрытия от исследуемых факторов:

$$\mu = 0,149 + 0,084x_1 - 0,013x_2 - 0,015x_3 + 0,005x_1x_2 - 0,003x_1x_3 - 0,0004x_2x_3 - 0,002x_1x_2x_3 \quad (24)$$

Анализ полученной зависимости показал, что рост давления инструмента на обрабатываемую поверхность ведет к уменьшению коэффициента трения в покрытии.

Металлографические исследования поверхности и поперечного шлифа гальванических покрытий на основе хрома позволили выявить три основных типа микроструктуры (рисунок 11):

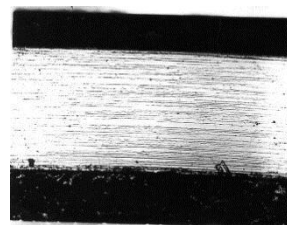
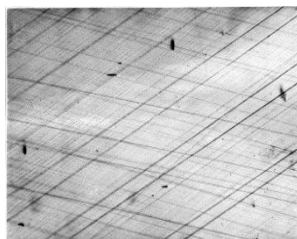
1 – полосатая беспористая структура на поперечном шлифе и отсутствие трещин на поверхности, характерная для ДУГКП;

2 – пористая структура с трещинами по сечению и на поверхности с широкими одиночными рисками-трещинами, нормальными к основанию, характерная для покрытий, получаемых из электролитов-суспензий;

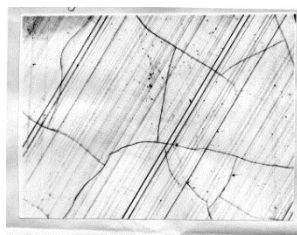
3 – пористая структура с трещинами по сечению, расположенными под углом к основанию и хаотичной сеткой на поверхности, характерная для покрытий, получаемых по стандартной технологии.

Тип структуры Поверхность покрытия ×50 Вид поперечного шлифа ×1000

1



2



3

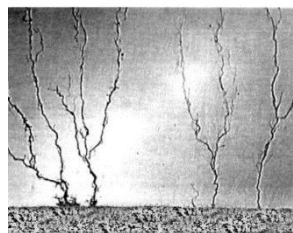


Рисунок 11 – Основные виды микроструктуры гальванических осадков

Как показали исследования, при плотности тока до 12 кА/м^2 формируются структуры первого типа, но начиная с плотности тока 12 кА/м^2 , формируются структуры второго типа. При дальнейшем увеличении плотности тока свыше 18 кА/м^2 на покрытии получаем структуру третьего типа.

Для определения эксплуатационных показателей получаемых ДУГКП проводились стендовые и эксплуатационные испытания. В результате эксплуатационных испытаний было установлено, что нижняя доверительная граница прогнозируемого среднего ресурса гидроцилиндров с нанесенным ДУГКП на основе хрома на рабочие поверхности составила 7819 часов, а нижняя доверительная граница 80 % ресурса – 6255 часов, что уже превышает нормативные значения 80 % ресурса серийных штоков в 1,06 раза. Результаты выполненных исследований представлены на рисунках 12, 13.

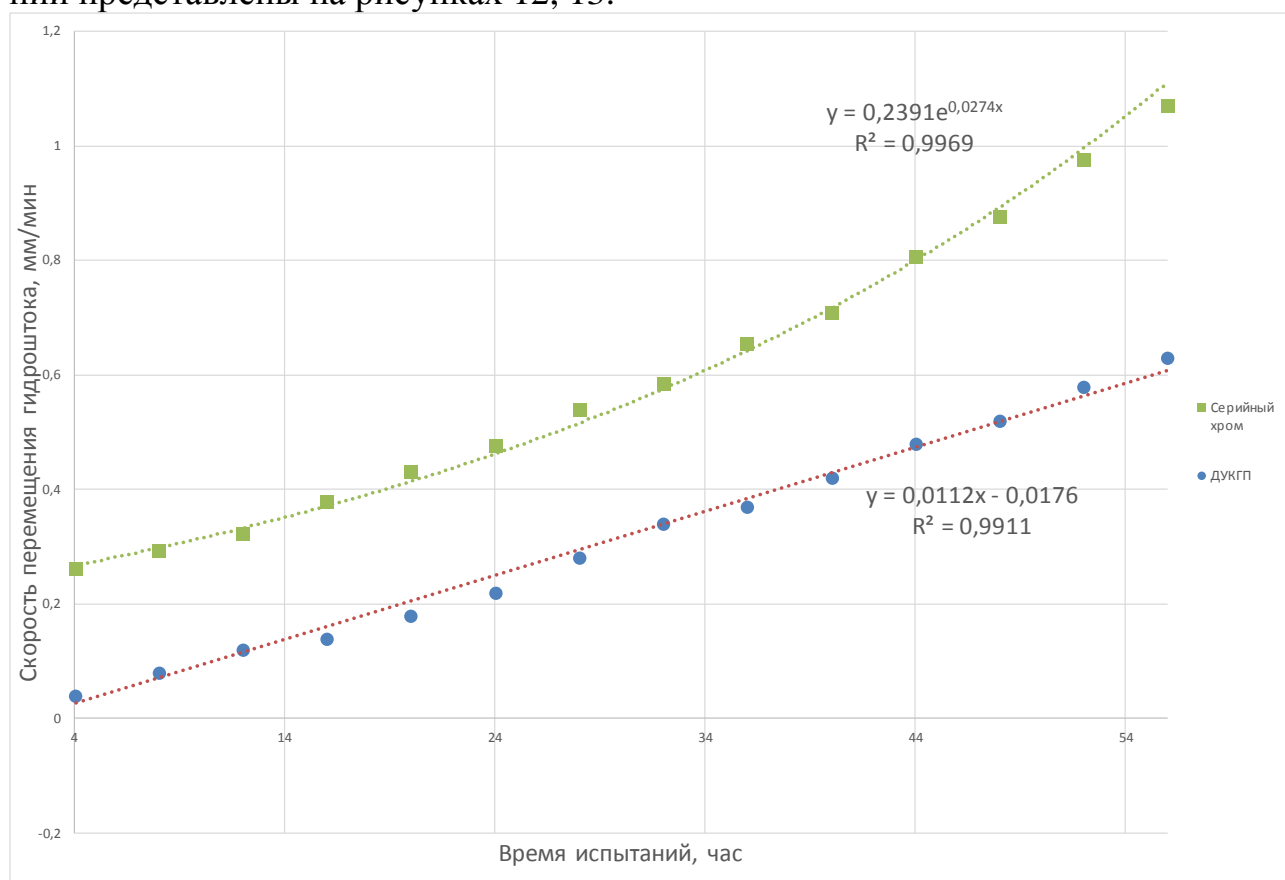


Рисунок 12 – Результаты стендовых испытаний гидроцилиндров

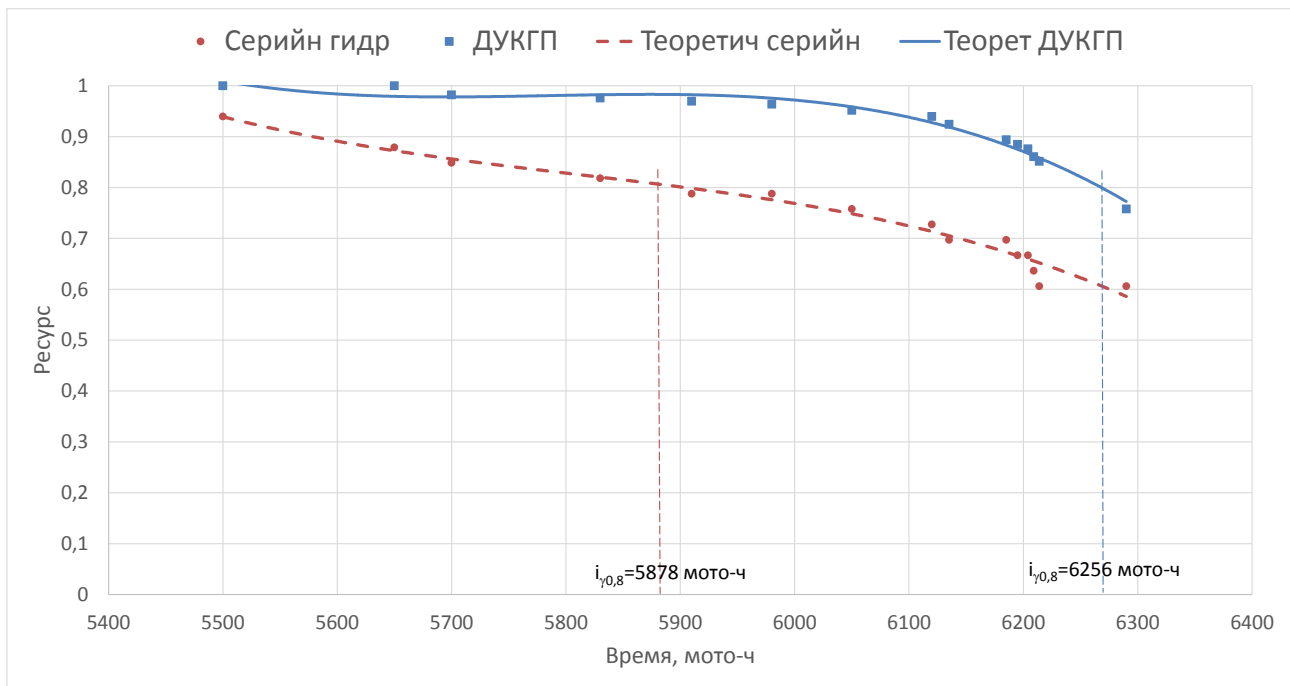


Рисунок 13 – Ресурсные испытания гидроцилиндров с нанесенных композиционным покрытием

По результатам испытаний были рассчитаны статистические параметры, характеризующие надежность и безотказность гидроцилиндров при их эксплуатации в реальных условиях, которые представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Статистические параметры, характеризующие надежность

Вероятность безотказной работы $P(t, +\Delta t)$		Частота отказов $f(t, +\Delta t), 10^{-3}\text{час}^{-1}$		Интенсивность отказов $\lambda(t, +\Delta t), 10^{-3}\text{час}^{-1}$	
Серийные	ДУКГП	Серийные	ДУКГП	Серийные	ДУКГП
0,96875	0,984375	0,01	0,005	0,010323	0,005079
0,9375	0,959375	0,01	0,008	0,010667	0,008339
0,90625	0,934375	0,01	0,008	0,011034	0,008562
0,875	0,909375	0,01	0,008	0,011429	0,008797
0,84375	0,878125	0,01	0,01	0,011852	0,011388
0,78125	0,846875	0,02	0,01	0,0256	0,011808
0,46875	0,753125	0,1	0,03	0,213333	0,039834
Средние					
0,825892857	0,895089286	0,024285714	0,011285714	0,042033927	0,013401042

Проведенные эксплуатационные испытания позволили заключить, что вероятность безотказной работы монотонно убывает с ростом наработки, но в случае с гидроцилиндрами, имеющими дисперсно-упрочненное композиционное покрытие на основе хрома в меньшей степени (в 1,08 раза) по сравнению со стандартными гидроцилиндрами. Частота и интенсивность отказов существенно возрастают к концу периода 80 % ресурса агрегатов, однако, в случае испытаний гидроцилиндра с ДУКГП на основе хрома в меньшей степени.

Раздел 5. «ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ И СХЕМЫ НАНЕСЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ».

Представленный в работе метод позволяет наносить многофункциональные покрытия, особенности нанесения которых зависят от выбора схемы обработки поверхности непосредственно в ванне с электролитом.

Методика выбора схемы обработки определяется следующими компонентами, обуславливающими варьирование качеств получаемых покрытий в заранее заданной области:

1. режимными параметрами осаждения;
2. типом материала, служащего подложкой под наносимое покрытие;
3. составом применяемого электролита.

Использование технологии нанесения ДУГКП ведет к расширению номенклатуры силовых гидроагрегатов, на которые возможно нанесение герметичного износостойкого дисперсно-упрочненного покрытия. Кроме того, предложенный метод расширяет верхнюю границу получения качественных покрытий, определяемую методом гальваномеханического осаждения. Это объясняется возможностью повышения давления инструмента при фиксированной скорости осаждения покрытия и замене силы трения скольжения, служащей причиной внедрения инструментальных частиц при методе гальваноконтактного осаждения, на силу трения качения, при использовании метода нанесения ДУГКП. При этом происходит повышение концентрации инструментального материала в покрытии, которое ведет к уменьшению усадки самого покрытия, устранению появления царапин в нем и, как следствие, отсутствию трещин на поверхности осадка. Однако указанное повышение имеет предел. Превышение определенного значения давления приводит к переупрочнению покрытия, его вспучиванию и шелушению. На рисунке 14 граница зоны, показывающая предельное значение сочетания скорости осаждения и давления инструмента для ДУГКП обозначена цифрами 1 и 2. Из рисунка видно, что такие покрытия раскрывают более широкие технологические возможности для получения герметичных износостойких осадков.

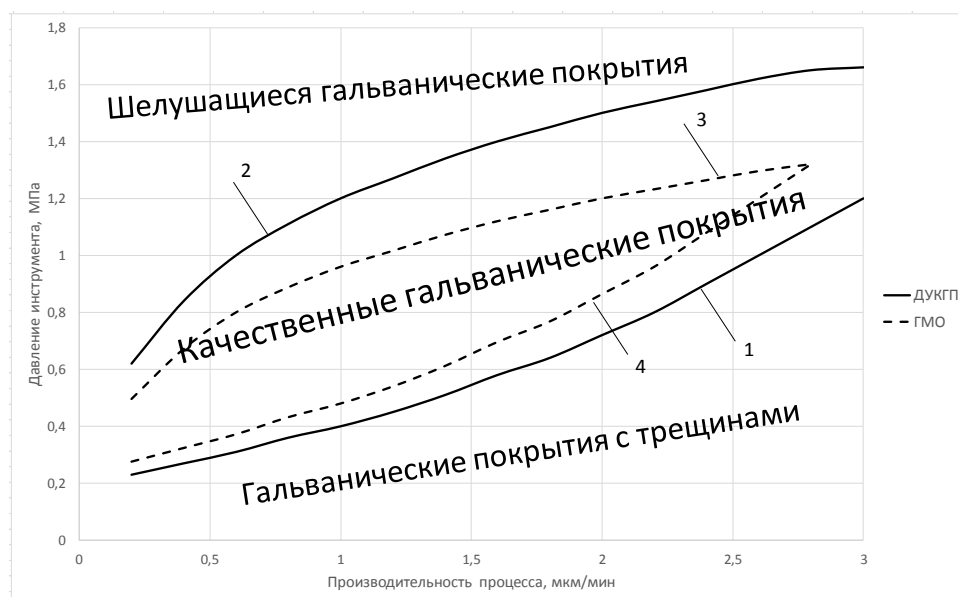


Рисунок 14 – Взаимосвязь качества осаждаемых покрытий с давлением инструмента и скоростью осаждения

Расчёт экономической эффективности разработанной технологии, произведенный по отраслевой методике на примере Воронежской области, в ценах 2020 года составил 5 946 224,49 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Решая поставленную научную проблему повышения надежности силовых гидравлических узлов сельскохозяйственной техники, в диссертационной работе разработан и исследован новый способ нанесения финишного износостойкого размерного герметичного дисперсно-упрочненного композиционного гальванического покрытия (патент РФ № 100520) для упрочнения и восстановления силовой гидравлической аппаратуры, позволяющий исключить риск получения распространенного дефекта – течи по хрому.

2. Представлена модель для расчета размеров наполнителя композиционного материала с целью обеспечения заданных физико-механических свойств получаемого покрытия, позволяющая прогнозировать напряжения в зависимости от условий его осаждения.

Установлено, что во избежание переупрочнения формируемого покрытия необходимо контролировать глубину зарождения пластической области в процессе гальваноконтактного осаждения, поскольку при контакте инструмента с восстанавливаемой поверхностью деформации подвергается не только верхний слой покрытия, но и нижележащие слои. В предположении допущений механики сплошных сред определено и практически подтверждено, что пластическая область зарождается не на поверхности покрытия, а на глубине 127 мкм, создавая разветвленную сетку трещин. Поэтому в процессе нанесения дисперсно-упрочненного композиционного гальванического покрытия необходимо корректировать давление инструмента до получения необходимой степени упрочнения формируемых слоёв.

3. Проведенные лабораторные испытания, базирующиеся на разработанной программе экспериментальных исследований, позволяющей оценить по оригинальной предложенной методике физико-механические свойства дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий (патент РФ № 2581412) позволили установить:

– Для композиционных покрытий на основе хрома, обладающих наименьшим сродством к веществам дисперсной фазы, определён рациональный состав композиции базового слоя: оксид алюминия – 5% по массе; карбид титана – 3% по массе; остальное – хромовая матрица. Дисперсность частиц – 0,9 мкм. Композиционное гальваническое покрытие при этом составе имеет наиболее высокую микротвердость.

Рациональное содержание дисульфида молибдена при нанесении финишного слоя электролитического покрытия на основе хромовой матрицы, имеющего наибольшую микротвердость: дисперсность частиц – 0,9 мкм; концентрация – 2,5% по массе.

– Режимные параметры осаждения базового и финишного слоя дисперсно-упрочненного композиционного гальванического покрытия: плотность тока

10–12 кА/м², температура электролита 60–65°C, давление инструмента 1,0–1,5 МПа, скорость главного движения 70–100 мин⁻¹ гарантируют получение герметичных осадков. Возникающие при данном режиме нанесения в осаждаемом покрытии остаточные напряжения сжатия не превосходят по абсолютной величине предел прочности хрома, что гарантирует получение покрытия с хорошей адгезией к основе, как на наружных, так и на внутренних цилиндрических поверхностях.

– Скорость нанесения базового слоя дисперсно-упрочненного гальванического композиционного покрытия на основе хрома превышает аналогичный показатель процесса гальваномеханического хромирования более чем в 2,15 раза, а стандартного хромирования в 7,4 раза. Скорость нанесения финишного слоя выше аналогичного показателя базового слоя в 1,27 раза, что объясняется использованием токопроводящего материала – дисульфида молибдена.

– Значение шероховатости поверхности получаемых покрытий не превышает значения 0,04 мкм, что позволяет использовать разработанный метод в качестве финишной обработки прецизионных деталей, исключая механическую обработку, и объясняется деформацией слоев осадка в процессе обработки, а также сокращением времени активного свободного роста кристаллов.

– Определена выравнивающая способность при восстановлении гидроцилиндров нанесением финишного износостойкого размерного герметичного дисперсно-упрочненного композиционного гальванического покрытия, характеризующая толщиной наносимого осадка как функцией величины погрешности формы детали.

– Скорость уменьшения адгезии покрытия при увеличении его толщины для стандартного хромового покрытия в 5,7 раза выше, чем для дисперсно-упрочненного гальванического композиционного покрытия на основе хрома.

– Введение мелкодисперсного наполнителя в гальваническую матрицу вызывает уменьшение степени наводораживания дисперсно-упрочненного гальванического композиционного покрытия в 2,35–3,46 раза по сравнению с покрытиями, полученными методом гальваномеханического хромирования и в 3,82–4,61 раза по сравнению со стандартными покрытиями.

– Установлено, что коррозионная стойкость дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий на основе хрома превосходит аналогичный показатель композиционных покрытий, полученных из электролитов-суспензий в 6 раз, а стандартного хромового покрытия в 12 раз.

– При плотности тока 10 кА/м², температуре электролита 62°C, давлении инструмента 1 МПа и частоте вращения детали 80 мин⁻¹ удаётся получать износостойкое размерное герметичное дисперсно-упрочненное композиционное гальваническое покрытие толщиной до 650 мкм.

– Дисперсно-упрочненное гальваническое композиционное покрытие на основе хрома значительно повышает стойкость к износу контактной пары как на этапе приработки, так и на установившемся режиме эксплуатации. Наличие включений дисульфида молибдена в контактном слое покрытия, играющих роль наполнителя хромовой матрицы, снижает коэффициент трения и, как следствие, повышает износостойкость детали и уплотнителей. Совокупная интенсивность

изнашивания пар трения с нанесенным дисперсно-упрочненным гальваническим композиционным покрытием на основе хрома меньше, чем у стандартных пар для штока в 1,29 раза, а для гильзы – в 1,25 раз.

– Коэффициент трения контактирующих пар, имеющих дисперсно-упрочненное гальваническое композиционное покрытие, ниже, чем у образцов пар трения серийного штока в 1,61 раза, а гильзы – в 1,41 раза; допустимая нагрузка стандартных пар трения ниже, чем пар трения с нанесенным дисперсно-упрочненным гальваническим композиционным покрытием у штока в 1,34 раза, а у гильзы в 1,19 раз; значения рабочих нагрузок пар трения с дисперсно-упрочненным гальваническим композиционным покрытием выше для штока в 1,43 раза, а для гильзы в 1,74 раза по сравнению со стандартными узлами.

– Металлографические и рентгеноструктурные исследования композиционных покрытий на основе хрома, полученных предлагаемым методом, показали возможность осаждения мелкозернистого покрытия, близкого к структуре покрытия типа «металлическое стекло», которое, как известно, характеризуется отсутствием пористости, износоустойчивостью, высокой механической прочностью.

– В ходе стендовых испытаний гидравлических утечек на серийных гидроцилиндрах было определено, что скорость перемещения гидроштока, вызванная утечками рабочей жидкости, в случае серийного покрытия в 1,94 раза больше, чем при использовании дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий.

4. В результате проведения эксплуатационных испытаний было установлено, что вероятность безотказной работы гидроцилиндров с нанесенными дисперсно-упрочненными гальваническими композиционными покрытиями на основе хрома в 1,08 раза выше в сравнении со стандартными гидроцилиндрами.

5. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований спроектировано и изготовлено оборудование и средства технологического оснащения, а также разработана технология для осуществления процесса нанесения герметичного размерного композиционного дисперсно-упрочненного гальванического покрытия на основе хрома.

В результате было установлено: при плотности тока до 23 кА/м² возможно нанесение покрытия со сжимающими остаточными напряжениями, что гарантирует получение герметичных осадков. С увеличением температуры электролита от 50 до 80°С остаточные напряжения из растягивающих, уменьшаясь по абсолютной величине, переходят в сжимающие. Это связано с уменьшением скорости осаждения гальванического хрома и, как следствие, уменьшением толщины элементарного слоя дисперсно-упрочненного покрытия, осаждаемого между двумя последовательными ходами инструмента. Каждый слой при этом претерпевает значительную деформацию, приводящую к возникновению сжимающих остаточных напряжений в покрытии. Увеличение давления инструмента на обрабатываемую поверхность приводит к возникновению напряжений сжатия в таком покрытии. Однако, при возрастании давления свыше 3,5 МПа на поверхно-

сти детали наблюдаются вспучивания и шелушения, вызванные переупрочнением покрытия и повышенной концентрацией частиц инструментального материала. Давление ниже 0,5 МПа не даёт требуемого наклёпа растущих слоев осадка. Осаждаемые покрытия получают с растягивающими остаточными напряжениями и характерной развитой сеткой трещин.

6. Определён суммарный экономический эффект при использовании технологии нанесения размерного износостойкого герметичного дисперсно-упрочненного гальванического композиционного покрытия на основе хрома в сравнении со стандартными технологиями при изготовлении и ремонте силовой гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники. В ценах 2020 года он составил 5 946 224,49 руб.

Предложения для реализации. Для ремонтных предприятий рекомендуется модернизация существующих технологий восстановления силовой гидравлической аппаратуры путем внедрения технологических процессов, позволяющих получать функциональные износостойкие герметичные дисперсно-упрочненные композиционные покрытия на основе хрома. Нанесение подобных покрытий следует проводить по модернизированной технологии подтвержденной патентами (патенты РФ на изобретение №100520, 258412) и представленной в данной работе. Для этих целей в качестве наполнителя рекомендуется использовать в базовом слое карбид титана (шлифпорошок КТ 1/0 ПОТ ТУ 1798-111-75420116-2006 – 3%) и оксида алюминия (шлифпорошок 25А М1 ГОСТ 28818-90 – 5%), а в финишном слое – дисульфид молибдена марки ДМИ-7, выпускаемый в Российской Федерации в соответствии с ТУ 48-19-133-90 – 2,5%.

Перспективы дальнейшей разработки темы.

Большой интерес для развития рассматриваемой темы представляют исследования в области теории упругости и пластичности многослойных композиционных материалов, а также размерного нанесения покрытия при восстановлении и упрочнении контактируемых поверхностей высокоресурсных деталей сельскохозяйственной техники. Они позволят более ясно представить механизм формирования и изменения напряженно-деформированного состояния в гальванических осадках и, как следствие, точнее прогнозировать предел их прочности. Кроме того, одной из приоритетных задач является изучение влияния других наполнителей в хромовой матрице на свойства получаемых покрытий с целью расширения спектра возможного использования таких осадков.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ

В журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of science

1. Penkov, N.A. About modeling kinematic parameters of deposition from composite electrochemical coatings for restoration of details for agricultural machines / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, A.I. Zavrazhnov, S.N. Sharifullin // IOP Conf. Series:

Materials science and engineering. – 570 – 2019. – 012104. – DOI:10.1088/1757-899X/570/1/012104.

2. Penkov, N.A. Analytical calculation of elastic modulus of composite electroplating coatings / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.N. Krasnova // MATPR 10241. – 2019. – P. 2515–2517.

3. Penkov, N.A. Determination of the elastic modulus of the composite dispersion-strengthened galvanic coatings / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.A. Krasnova // Engineering studies. – 2018. – Issue 3 (2). – Vol. 10. – P. 729–737.

4. Penkov, N.A. Dispersion-hardened composite coatings with desired physical and mechanical properties / Zhachkin S.Yu., N.A. Penkov, M.N. Krasnova // Engineering Computations. – 2017. – № 8 (2). – Vol. 34. – P. 2577–2586.

5. Penkov, N.A. The impact of the strengthening phase filler on the properties of composite dispersion-strengthened galvanic coatings / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.A. Krasnova, A.I. Zavrazhnov // Engineering computations. – 2018. – № 8 (2). – Vol. 35. – P. 3245–3251.

6. Penkov, N.A. The technical definition of permanent dispersion-strengthened composite multilayer galvanic coatings / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.A. Krasnova // Australian journal of education and science. – 2018. – Vol. XI. – № 1 (21). – P. 238–253.

7. Penkov, N.A. To the question of the influence on pressure of the tool on the processed surface when applying the dispensable-strengthened composite galvanic coatings / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.N. Krasnova // MATPR 10241. – 2019. – P. 2512–2514.

8. Penkov N.A. Wear-resistance of composite galvanic chrome coatings / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.N. Krasnova // Engineering Studies. – 2017. – Issue 3 (2). – Vol. 9. – P. 529–536.

9. Penkov N.A. Investigation and prediction of adhesion strength of plasma coatings by mathematical modeling of deposition parameters / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, G.I. Trifonov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment. – 2020. – P. 22017–22021.

10. Penkov N.A. About using composite materials when restoring high-resource details with application of additive technologies are given / S.N. Yatsenko, N.A. Penkov, A.A. Krasnov // Solid state phenomena. – 2020. – Vol. 316. – P. 862–868.

11. Penkov N.A. Thermophysical parameters of the process to obtain the required microgeometry of composite electroplating coatings based on chromium / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, R.V. Belyaev, M.V. Kirgintsev // Materials today: Proceedings. – 2021. – Vol. 38. – P. 1760–1763.

12. Penkov N.A. About determining the microhardness of composite coatings / S.Yu. Zhachkin, A.I. Zavrazhnov, N.A. Penkov, G.V. Kudryavtsev, P.V. Tsisarenko // Materials science forum. – 2021. – Vol. 1037. P. 486–493.

13. Penkov N.A. Estimation of the elasticity modulus of composite electroplated coatings during their layer-by-layer deposition / S.Yu. Zhachkin, A.I. Zavrazhnov,

N.A. Penkov, A.V. Martynov, R.N. Zadorozhny // Engineering technologies and systems. – 2021. – Vol. 31 (3). P. 430-448.

14. Пеньков Н.А. Оценка модуля упругости композитных гальванических покрытий при их послойном осаждении / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин, А.И. Завражнов, А.В. Мартынов, Р.Н. Задорожний // Engineering technologies and systems. – № 3. – 2021. – Vol. 31. – P. 430–448.

В журналах, рецензируемых и рекомендованных ВАК РФ

15. Пеньков, Н.А. Влияние дисперсной фазы наполнителя на свойства композитного хромового покрытия / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, О.А. Сидоркин, С.В. Нелысов // Труды ГОСНИТИ. – 2017. – Т. 126. – С. 168–175.

16. Пеньков, Н.А. Влияние кинематики движения инструмента на формирование износостойкого покрытия / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов, М.А. Краснова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2018. – Т. 14. № 2. – С. 142–148.

17. Пеньков, Н.А. Влияние плазменной обработки на структуру, фазовый состав и микротвердость стали Р6М5 / Н.А. Пеньков // Журнал «Научное образование». – № 3 (8). – 2020. – Номер публикации: 15-2006171903.

18. Пеньков, Н.А. Влияние режимов электролиза на микротвердость дисперсно-упрочненных композитных материалов на основе железа / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, Р.Н. Задорожний, С.В. Нелысов // Труды ГОСНИТИ. – 2017. – Т. 128. – С. 55–61.

19. Пеньков, Н.А. Восстановление изношенной внутренней поверхности гильз цилиндров дизельных двигателей композитным гальваническим покрытием / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин, А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, М.Н. Краснова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – № 5 (161). – С. 225–227.

20. Пеньков, Н.А. Моделирование влияния размеров и концентрации упрочняющей фазы наполнителя на свойства дисперсно-упрочненных композитных гальванических покрытий / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков // Труды ГОСНИТИ. – 2017 г. – Т. 129. – С. 193–198.

21. Пеньков, Н.А. Моделирование качества восстановления деталей гальваническими композитными покрытиями при струйном методе осаждения / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, М.В. Киргинцев, Р.Н. Задорожний // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2019. – № 7. – С. 30–33.

22. Пеньков, Н.А. Моделирование механического воздействия инструмента при получении гальванических композитных покрытий / С.Ю. Жачкин, М.Н. Краснова, Н.А. Пеньков, А.И. Краснов // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 120. – С. 130–135.

23. Пеньков, Н.А. Моделирование процесса осаждения композитных покрытий на основе хрома / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов // Виртуальное моделирование прототипирование и промышленный дизайн. – 2018. – Вып. 4. – С. 59–63.

24. Пеньков, Н.А. Моделирование режимов осаждения композитных гальванических дисперсно-упрочненных покрытий при восстановлении деталей сельхозмашин / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин, В.П. Лялякин, М.Н. Краснова // Труды ГОСНИТИ. – 2018. – Т. 131. – С. 237–243.
25. Пеньков, Н.А. Оценка модуля упругости композитных гальванических покрытий при их послойном осаждении / С.Ю. Жачкин, А.И. Завражнов, Н.А. Пеньков, А.В. Мартынов, Р.Н. Задорожний // Инженерные технологии и системы. – Т.31. – № 3. – 2021. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202103.430-448.
26. Пеньков, Н.А. Обеспечение износостойкости композитных покрытий на основе хрома / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков // Технический сервис машин. – 2019. – № 2 (135). – С. 170–177.
27. Пеньков, Н.А. Обеспечение качественно-точностных характеристик при восстановлении деталей автотранспорта / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, М.Н. Краснова, А.А. Плахотин, Р.Н. Задорожний // М.: Технический сервис машин. – № 1 (138). – 2020. – С. 93–99.
28. Пеньков, Н.А. Оборудование для размерного нанесения гальванических композитных покрытий / Н.А. Пеньков. – Журнал «Научное образование». – № 3 (8). – 2020. – Номер публикации: 15-2006171905.
29. Пеньков, Н.А. Определение оптимальной скорости нанесения композитных гальванических покрытий / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, Р.Н. Задорожний, О.П. Багно // Международная научно-техническая конференция «Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства». – 2019. – С. 16–17.
30. Пеньков, Н.А. Повышение износостойкости деталей гидроприводов прессового оборудования гальваническими композитными покрытиями / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, Р.Н. Задорожний // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2017. – № 9. – С. 29–32.
31. Пеньков, Н.А. Обеспечение качественно-точностных характеристик при восстановлении деталей автотранспорта / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин, А.И. Завражнов, О.А. Сидоркин // Технический сервис машин. – Т. 59. – № 3 (144). – С. 116–121. – DOI 10.22314/2618-8287-2021-59-3-116-121.
32. Пеньков, Н.А. Повышение надежности контактных поверхностей подъемного механизма путем комбинированной плазменной обработки / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, М.Н. Краснова, Г.И. Трифонов // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2017. – № 1. – С. 140–145.
33. Пеньков, Н.А. Системный анализ при моделировании напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя при нанесении композитных покрытий методом ГКО / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, В.В. Михайлов, Г.В. Зибров // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2013. – № 6. – С. 63–67.
34. Пеньков, Н.А. Управление внутренними напряжениями в гальванических композитных покрытиях на основе железа / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков,

О.А. Сидоркин, С.В. Нелысов // Труды ГОСНИТИ. – 2017. – Т. 129. – С. 183–188.

В монографиях и учебных пособиях

35. Пеньков Н.А. Восстановление гидроцилиндров дисперсно-упрочненным гальваническим композитным покрытием на основе хрома: монография / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин, О.А. Сидоркин, М.Н. Краснова. – Воронеж: ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет", 2017. – 160 с.

В других изданиях и материалах конференций

36. Пеньков Н.А. Модернизация методики измерения прочности сцепления электролитических покрытий с основой / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 115 годовщине со дня рождения профессора Харитончика Ефима Мироновича. Секция 2. Технические науки. 6 апреля 2017 года. Воронеж, ВГАУ. Том 2. С. 40–43.

37. Пеньков Н.А. К вопросу моделирования струйного осаждения гальванических композитных покрытий при различных углах атаки / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин, М.В. Киргинцев, И.А. Спицын // Материалы международной научно-практической конференции «Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе». Ч. 2. 2018. – С. 247–250.

38. Пеньков Н.А. Влияние кинематических режимов плазменного напыления на температуру нагрева детали / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов // Авиакосмические технологии: Тезисы XIX Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. 2018. – С. 163–165.

39. Пеньков Н.А. Прогнозирование толщины плазменного покрытия при восстановлении сложнопрофильных поверхностей / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов // Материалы международной научно-практической конференции «Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе». Ч.2. 2018. – С. 70–78.

40. Пеньков Н.А. Моделирование кинематических параметров осаждения композитных гальванических покрытий для восстановления деталей сельхозмашин / С.Ю. Жачкин, С.Н. Шарифуллин, Н.А. Пеньков, А.И. Завражнов // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы: материалы IX-ой Международной научно-технической конференции. Казань: Издательство ООО «Фолиант», 2018. – С. 267–271.

41. Пеньков Н.А. Управление прочностными параметрами композитных покрытий на основе хромовой матрицы / Н.А. Пеньков, И.А. Мандрыкин, А.А. Краснов // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК:

материалы XV-ой Международной научно-практической конференции. Ставрополь: Издательство «Агрис», 2019. – С. 440–447.

42. Пеньков Н.А. Установка для нанесения композитных покрытий на сложнопрофильные поверхности деталей / Н.А. Пеньков, Г.И. Трифонов // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: материалы XV-ой Международной научно-практической конференции. Ставрополь: Издательство «Агрис», 2019. – С. 453–460.

43. Пеньков Н.А. О зависимости модулей упругости гальванических композитных покрытий от их параметров осаждения / Н.А. Пеньков, С.Г. Свиридов // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: материалы XV-ой Международной конференции. Ставрополь: Издательство «Агрис», 2019. – С. 447–453.

44. Пеньков Н.А. К вопросу определения оптимальной скорости нанесения композитных гальванических покрытий / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, О.П. Багно, Р.Н. Задорожний // Сб. материалов международной научно-технической конференции «Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства» 2019. – М., доклад № 46.

45. Пеньков Н.А. Обеспечение качественно-точных характеристик при восстановлении деталей автотранспорта / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, М.Н. Краснова, А.А. Плахотин // Сб. материалов международной научно-технической конференции «Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства» 2019. – М., доклад № 16.

Патенты и авторские свидетельства

46. Пеньков, Н.А. Устройство для формирования трубчатых изделий из композиционных материалов : пат. № 2581412 / С.Ю. Жачкин, Н.В. Жачкина, Ю.С. Пенькова, В.Ф. Лазукин, О.А. Сидоркин, Н.А. Пеньков // Российская Федерация: МПК7 В29С53/04. Заявитель и патентообладатель: ФГОУ ВПО ВГТУ. – № 2014118172/05, заявл. – 05.05.2014; опубл. – 20.04.2016. – Бюл. № 11 – 4 с.

47. Пеньков, Н.А. Устройство получения композитных гальванических покрытий на внутренних поверхностях : пат. № 100520 / С.Ю. Жачкин, П.В. Цысорок, Н.А. Пеньков, О.А. Сидоркин, А.А. Живогин // Российская Федерация: МПК С25Д 5/22. Заявитель и патентообладатель: ФГОУ ВПО ВГТУ. – № 2010116716/02; заявл. – 27.04.2010; опубл. – 20.12.2010. – Бюл. № 35. – 6 с.

48. Пеньков, Н.А. Устройство нанесения размерных гальванических покрытий в отверстиях малого диаметра : пат. № 207313 / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, Г.И. Трифонов, А.В. Федоров // Российская Федерация: МПК С25Д 5/04. Заявитель и патентообладатель : ВУНЦ ВВС «ВВА». – № 2021105698; заявл. – 04.03.2021; опубл. – 22.10.2021. – Бюл. № 30. – 4 с.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ
Подписано в печать 25.01.2022 г. Формат 60x84/16,
Бумага офсетная № 1. Усл.печ.л. 2,2. Тираж 100 экз. Ризограф
Заказ № 20682

Издательско-полиграфический центр
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ
393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101,
тел. +7 (47545) 3-88-34, доб. 211

