

На правах рукописи



Шишурин Сергей Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АГРЕГАТОВ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ
ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫМИ
ГАЛЬВАНО-ХИМИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ**

**Специальность 05.20.03 – Технологии и средства
технического обслуживания в сельском хозяйстве**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Саратов 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова».

Научный консультант	доктор технических наук, профессор Сафонов Валентин Владимирович
Официальные оппоненты:	Лялякин Валентин Павлович , доктор технических наук, профессор ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», главный специалист Величко Сергей Анатольевич , доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарева», профессор кафедры технического сервиса машин Кисель Юрий Евгеньевич , доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Брянский ГАУ», профессор кафедры электроэнергетики и автоматики
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет».

Защита состоится «20» декабря 2019 года в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.03 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» и на сайте: <http://www.sgau.ru/>

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл., 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 220.061.03, e-mail: chekmarev.v@yandex.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

**Ученый секретарь
диссертационного совета**



Василий Васильевич Чекмарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Важнейшим документом, определяющим аграрную политику страны до 2020 года, является «Доктрина продовольственной безопасности страны», утвержденная Президентом Российской Федерации 30 января 2010 года, в которой указано, что обеспечение продовольственной безопасности страны сопряжено с рисками, которые могут существенно ее ослабить. Большое внимание уделено также необходимости увеличения темпов структурно-технологической модернизации, освоению новых технологий, обеспечивающих повышение производительности труда и ресурсосбережение в сельском хозяйстве.

В настоящее время инженерно-техническая система сельского хозяйства характеризуется отсутствием эффективной инженерной инфраструктуры, системы инновационных и интеллектуальных преобразований сельхозпроизводства, негативными явлениями в материально-техническом обеспечении сельхозтоваропроизводителей, а также разобщенностью участников системы и их правовой неурегулированностью. Такое состояние может привести к невозможности выхода к 2020 г. на рубежи сельскохозяйственного производства, намеченные «Государственной программой развития сельского хозяйства России на 2013–2020 гг.».

В большинстве регионов страны сохраняется востребованность в ремонте агрегатов сельскохозяйственной техники и восстановлении их ресурсопределяющих деталей. Эта тенденция подтверждается и мировым опытом. Поэтому создание высокоресурсных ремонтных центров по восстановлению работоспособности таких агрегатов, как двигатель, дизельная топливная аппаратура, гидротрансмиссия, турбокомпрессор и других наиболее сложных узлов становится одним из перспективных направлений развития сельского хозяйства.

Надежность сельскохозяйственной техники в основном лимитируется топливной и гидравлической аппаратурой. Так, на долю топливной аппаратуры приходится до 42 % всех неисправностей и отказов, а на долю гидравлической – до 26 %. Ресурс топливной и гидравлической аппаратуры определяется ресурсом прецизионных деталей – плунжерных и золотниковых пар.

В настоящее время разработан ряд способов восстановления прецизионных деталей агрегатов сельскохозяйственной техники, однако они имеют существенные недостатки и не всегда обеспечивают ресурс новых деталей. В связи с этим разработка новых инновационных технологий,

повышающих эффективность восстановления деталей современна, своевременна и актуальна.

Одними из наиболее перспективных способов восстановления прецизионных деталей агрегатов сельскохозяйственной техники являются нанокпозиционные гальвано-химические покрытия. Они представляют собой гальванически или химически осажденный металл с включением в него различных наноразмерных частиц. Применение наноразмерных частиц позволяет значительно улучшить служебные свойства получаемых покрытий.

В связи с этим в диссертационной работе была поставлена научная проблема, решение которой заключалось в теоретическом прогнозировании ресурса сопряжений восстановленных прецизионных деталей, а также в разработке и внедрении в производство новых технологий восстановления прецизионных деталей агрегатов сельскохозяйственной техники нанокпозиционными гальвано-химическими покрытиями.

Актуальность работы подтверждается тем, что она была выполнена в соответствии с основными положениями «Стратегии машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России на период до 2020 года», «Стратегии развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2030 года», а также научно-технической программы «Обеспечение ресурсосбережения путем повышения надежности сельскохозяйственной техники и снижения энергозатрат в процессе ее эксплуатации» научного направления ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» «Модернизация инженерно-технического обеспечения АПК» (рег. № 01201151795).

Исследования проведены в соответствии с темой научно-исследовательской работы гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых РФ МК-3789.2009.8 «Разработка технологий получения и исследование свойств нанокпозиционных гальвано-химических покрытий на основе никеля и железа». А также темами научно-исследовательских работ по заказу Министерства сельского хозяйства РФ: «Провести исследования процесса гальвано-химических покрытий нанодисперсными материалами» – 2010 г; «Разработка инновационной технологии восстановления работоспособности агрегатов гидросистем импортной автотракторной техники с применением нанокпозиционных химических покрытий» – 2013 г; «Разработка технологии нанесения нанокпозиционных гальванических покрытий для повышения долговечности быстроизнашивающихся деталей сельскохозяйственной техники» – 2017 г.

Степень разработанности темы. Исследованиями в области ремонта топливной и гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники занимались и занимаются: В.В. Антипов, В.И. Барышев, Н.И. Бахтиаров, Р.М. Баширов, С.А. Величко, М.М. Вихерт, В.А. Дидур, Б.П. Загородских, Е.В. Кипер, В.Г. Кислов, П.М. Кривенко, А.Т. Лебедев, В.Н. Лозовский, Н.И. Лихачев, В.Е. Логинов, В.П. Лялякин, А.А. Матвеев, Н.С. Мясоедов, В.В. Сафонов, А.И. Селиванов, Т.А. Сырицын, Б.Н. Файнлейб, В.Е. Черкун, С.Н. Шарифуллин, В.М. Янсон и др. Вопросы модернизации гальванических и химических покрытий дисперсными материалами отражены в работах таких ученых, как Л.И. Антропов, А.И. Бодневас, И.Н. Бородин, Л.А. Браутман, В.А. Вандышев, Г.В. Гурьянов, Ю.Е. Кисель, Р.В. Крок, Ю.Н. Лебединский, В.Ф. Молчанов, Ю.Н. Петров, Р.С. Сайфуллин, В.В. Сафонов, Р.А. Усманов, В.И. Филатов, И.Г. Хабибуллин и др. Зарубежные авторы, работающие в этом направлении: К.Х. Гайгалас, М. Дзахо, Й. Коньс, Й. Лоренз, Ю.Ю. Матулис, Ц. Нолд, С.С. Рагигскене, Д.Я. Раманаускене, Т. Фудзии, Г. Шанз и др.

Большинство ученых при разработке новых технологий и получении композиционных покрытий использовали крупнодисперсные материалы микрометрового диапазона. Однако наиболее перспективным представляется применение наноразмерных частиц, так как они повышают седиментационную устойчивость рабочих растворов и дают возможность получать покрытия с улучшенными технологическими свойствами. Влияние наноразмерных частиц на свойства гальвано-химических покрытий в настоящее время остается малоизученным и представляет большой научно-практический интерес.

Цель работы – увеличение межремонтного ресурса агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники путем разработки и применения новых технологических способов восстановления прецизионных деталей нанесением наноконпозиционных гальвано-химических покрытий на основе хрома, железа и никеля.

Задачи исследования:

1. На основании литературных данных определить низкоресурсные агрегаты сельскохозяйственной техники и их ресурсоопределяющие сопряжения. Провести анализ существующих способов восстановления прецизионных деталей агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры.

2. Разработать теоретические модели прогнозирования ресурса сопряжений прецизионных деталей агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники, восстановленных наноконпозиционными гальвано-химическими покрытиями.

3. Обосновать способы восстановления прецизионных деталей агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники, определить материалы наноразмерных частиц, их концентраций в электролитах и химическом растворе, а так же режимы нанесения нанокпозиционных гальвано-химических покрытий на основе хрома, железа и никеля с требуемыми физико-механическими свойствами.

4. Исследовать морфологию, структуру, механические и триботехнические свойства нанокпозиционных гальвано-химических покрытий на основе хрома, железа и никеля при восстановлении прецизионных деталей агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники.

5. Провести стендовые и эксплуатационные испытания агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники с прецизионными деталями, восстановленными нанокпозиционными гальвано-химическими покрытиями, установить значения средних межремонтных ресурсов отремонтированных агрегатов.

6. На основе предложенных способов разработать технологии восстановления прецизионных деталей агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники с применением нанокпозиционных гальвано-химических покрытий и определить их технико-экономическую эффективность.

Объект исследования – прецизионные детали агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники и способы их восстановления.

Предмет исследования – физико-механические свойства гальвано-химических покрытий хрома, железа и никеля модифицированных наноразмерными частицами при восстановлении прецизионных деталей.

Научную новизну работы представляют:

- теоретические модели прогнозирования ресурса сопряжений прецизионных деталей агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники, восстановленных нанокпозиционными гальвано-химическими покрытиями;

- материалы наноразмерных частиц, их концентрации в электролитах и химическом растворе, режимы нанесения нанокпозиционных гальвано-химических покрытий на основе хрома, железа и никеля для получения покрытий с улучшенными физико-механическими свойствами;

- новые способы, составы электролитов и химического раствора и установка для получения нанокпозиционных гальвано-химических

покрытий на основе хрома, железа и никеля (патенты РФ № 2283373, 2610381, 2465374, 2680116);

- результаты исследования морфологии, структуры, физико-механических и эксплуатационных свойств нанокпозиционных гальвано-химических покрытий на основе хрома, железа и никеля при восстановлении прецизионных деталей агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в разработке теоретических моделей механизма упрочнения гальвано-химических покрытий, за счет применения наноразмерных частиц, позволяющих прогнозировать повышение ресурса сопряжений прецизионных деталей при их восстановлении;

- в выборе материалов наноразмерных частиц, их концентраций в электролитах и химическом растворе и установлении режимов нанесения нанокпозиционных покрытий на основе хрома, железа и никеля для получения покрытий с задаваемыми физико-механическими свойствами, которые могут быть использованы при разработке новых технологий восстановления деталей;

- в практическом использовании на предприятиях АПК новых технологических процессов восстановления прецизионных деталей агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники с применением нанокпозиционных гальвано-химических покрытий на основе хрома, железа и никеля;

- в применении результатов исследований в учебном процессе образовательных заведений всех форм собственности при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий по вопросам ремонта агрегатов сельскохозяйственной техники.

Методология и методы исследований. Методология исследований построена на основных принципах изнашивания прецизионных деталей агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники, электролиза и условий развития и адекватности исследовательских подходов и средств, позволяющих получить истинные знания об объекте, его физико-механических свойствах, долговечности.

Основными методами исследований служили эмпирические (наблюдение, сравнение, счет, измерение), экспериментально-теоретические, метод математического планирования экспериментов, статистические методы обработки данных, анализ, синтез и обобщение полученных результатов. Все исследования проводили согласно ГОСТам.

При проведении исследований использовали современные приборы и установки. Для разагрегативирования электролитов и химического раствора, содержащих наноразмерные частицы, применяли ультразвуковой генератор УЗГ-2М. Покрытия получали на установке для нанесения нанокomпозиционных гальвано-химических покрытий собственного изготовления (патент РФ № 2680116). Корректировку кислотности электролитов и растворов осуществляли с помощью ионометрического преобразователя И-500. Микротвердость измеряли на микротвердомере DuraScan-20. Структуру и элементные составы покрытий исследовали с помощью комплекса Mira II Tescan, износостойкость – на модернизированной машине трения МИ-1М. Испытания на коррозионную стойкость проводили с применением установки для коррозионных испытаний собственного изготовления, стендовые испытания – на стендах КИ-22205-01 и КИ-4815М. При эксплуатационных испытаниях использовали тракторы, выполняющие различные сельскохозяйственные работы. Экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики с использованием программы для анализа данных Statistica, а результаты, полученные графическим способом, – с помощью программ Компас-3D и Microsoft Excel.

Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

- теоретические модели прогнозирования ресурса сопряжений прецизионных деталей агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники, восстановленных нанокomпозиционными гальвано-химическими покрытиями;
- результаты исследований влияния материалов наноразмерных частиц, их концентраций и режимов нанесения нанокomпозиционных гальвано-химических покрытий на основе хрома, железа и никеля на процесс формирования структуры и основные физико-механические свойства покрытий;
- технологии восстановления плунжерных пар топливных насосов высокого давления с применением нанокomпозиционного электролитического покрытия на основе хрома, золотниковых пар гидрораспределителей с применением нанокomпозиционного электролитического покрытия на основе железа и нанокomпозиционного химического покрытия на основе никеля;
- результаты сравнительных стендовых и эксплуатационных испытаний агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники с прецизионными деталями,

восстановленными с применением нанокomпозиционных гальвано-химических покрытий на основе хрома, железа и никеля, и оценка экономической эффективности предлагаемых технологий.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследований обеспечена применением высокоточной измерительной аппаратуры и приборов, стандартных методик исследований, обработкой экспериментальных данных методами математической статистики, высокой величиной сходимости теоретических и экспериментальных данных, их подтверждением при практической реализации разработок в лабораторных, стендовых и производственных условиях.

Разработанные технологии восстановления прецизионных деталей с применением нанокomпозиционных гальвано-химических покрытий на основе хрома, железа и никеля внедрены в производство в ООО «Дизельремгруппа» (г. Санкт-Петербург), ООО Инновационный центр «ТрансЭнергоКомплект-С» (г. Саратов), ООО «Краснокутский электромеханический завод» (г. Красный Кут), ООО «Новые Транспортные Технологии» (г. Санкт-Петербург), ОАО «Ремонтный завод «Хоперский» (г. Балашов), ООО «Ремтехагро» (г. Саратов), ООО «Саратовдизельаппарат» (г. Саратов), ООО «Сельхозтехника» (г. Балашов).

Основные научные положения, результаты исследований, выводы и практические рекомендации диссертации были доложены, обсуждены и одобрены:

- на Международных и всероссийских научно-практических конференциях и семинарах, проводимых в ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова» (Саратов, 2003–2019 гг.);
- на Саратовском салоне изобретений, инноваций и инвестиций (Саратов, 2010–2013 гг., 2017 г.);
- на Российской агропромышленной выставке «Золотая осень» (Москва, 2013–2018 гг.);
- на Международной научно-практической конференции «Народное хозяйство Западного Казахстана: состояние и перспективы развития» (Уральск, 2004 г.);
- на Всероссийской научно-практической конференции «Защитные покрытия в машиностроении и приборостроении» (Пенза, 2005 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Сохранение окружающей среды – важнейшая проблема современности» (Орел, 2005 г.);

- на Международной научной конференции «Трибология и надежность» (Санкт-Петербург, 2007 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии механизации, автоматизации и технического обслуживания в АПК» (Орел, 2008 г.);
- на Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности функционирования механических и энергетических систем» (Саранск, 2009 г.);
- на Международном форуме по нанотехнологиям «Rusnanotech-2009» (Москва, 2009 г.);
- на Всероссийской молодежной интернет-конференции «Новые материалы, наносистемы и нанотехнологии» (Ульяновск, 2010 г.);
- на Международных научно-практических конференциях, в рамках международных агропромышленных выставок «Агроуниверсал-2010, 2015, 2016, 2017» (Ставрополь, 2010 г., 2015-2017 гг.);
- на Российском форуме «Российским инновациям – российский капитал» (Оренбург, 2011 г.);
- на заседании президиума Россельхозакадемии (Москва, 2012 г.);
- на VII, VIII индустриальных форумах «Саратов СОФИТ-ЭКСПО» (Саратов, 2015-2016 гг.);
- на агропромышленных форумах «Саратов-Агро – 2018», «Саратов-Агро – 2019» (Саратов, 2018-2019 гг.).

Основные положения диссертации отражены в 76 научных работах, в том числе 18 статей в рецензируемых научных журналах, 4 статьи в изданиях, включенных в базы Web of Science и Scopus, 4 патента РФ на изобретения. Общий объем публикаций – 112,4 печ. л., из которых 66,2 печ. л. принадлежит соискателю.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, рекомендаций производству, перспектив дальнейшей разработки темы, списка литературы из 234 наименований, из которых 22 на иностранном языке, и 13 приложений. Работа изложена на 276 страницах, содержит 22 таблицы, 88 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика работы, обоснованы ее актуальность, научная новизна, практическая ценность, изложены научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

В **первой главе «Состояние проблемы. Постановка цели и задач исследования»** на основе анализа надежности сельскохозяйственной техники, перспективных способов восстановления ресурсопределяющих деталей, а также научных работ по теме диссертации сформулированы проблема, цель и задачи исследований.

Анализ надежности сельскохозяйственной техники позволил установить, что она в большой степени определяется ресурсом агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры, на которые приходится до 42 и 26 % всех неисправностей и отказов соответственно. Агрегатами, лимитирующими долговечность топливной и гидравлической аппаратуры, являются топливные насосы высокого давления и гидрораспределители, ресурсы которых в свою очередь ограничены ресурсами плунжерных и золотниковых пар.

Основным видом изнашивания сопряжений плунжерных и золотниковых пар является гидроабразивное разрушение рабочих поверхностей, омываемых жидкостью, сопровождающееся гидравлическим и механическим защемлением. Снизить износ и исключить схватывание в прецизионных парах топливной и гидравлической аппаратуры можно за счет повышения микротвердости рабочих поверхностей с учетом подбора триботехнически совместимых материалов для сопрягаемых поверхностей.

Существующие способы восстановления плунжерных и золотниковых пар имеют существенные недостатки, поэтому разработка новых технологий, повышающих эффективность восстановления деталей, является актуальной научной проблемой. Наиболее перспективными для восстановления ресурсопределяющих деталей топливной и гидравлической аппаратуры являются нанокпозиционное электролитическое хромирование, нанокпозиционное электролитическое железнение, нанокпозиционное химическое никелирование. Такие покрытия представляют собой электролитически или химически осажденный металл с заданным распределением в нем различных наноразмерных материалов.

Механизм соосаждения наноразмерных частиц и гальвано-химических покрытий малоизучен и определяется сложной корреляционной взаимосвязью факторов, зависящих как от природы, формы и размеров частиц, так и от условий осаждения покрытий. Наиболее вероятно получение качественных нанокпозиционных гальвано-химических покрытий при

использовании неэлектропроводных частиц второй фазы, имеющих шарообразную форму и размеры 0,01...0,1 мкм.

Анализ литературных источников показал, что наиболее эффективным вариантом решения проблемы повышения долговечности прецизионных деталей топливной и гидравлической аппаратуры может быть модификация гальвано-химических покрытий новыми наноразмерными материалами. Это решение и обуславливает необходимость дальнейшего развития и углубления экспериментальных и теоретических исследований данной проблемы.

Во второй главе «Теоретическое обоснование повышения долговечности агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры» рассмотрены теоретические зависимости влияния нанокпозиционных гальвано-химических покрытий на ресурсы сопряжений агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры.

В исследованиях, проведенных И.В. Крагельским, Д.Н. Гаркуновым и А.А. Старосельским, установлена зависимость ресурса сопряжения от скорости изнашивания, а также известно, что ресурс сопряжения при неизменном предельном зазоре определяется скоростями изнашивания сопрягаемых деталей.

На основании анализа литературных данных установлено, что в плунжерных и золотниковых парах преобладающими являются пластическое оттеснение металла и микрорезание.

В работах И.В. Крагельского и Д.Н. Гаркунова установлена суммарная зависимость интенсивности изнашивания при совместном действии нескольких видов изнашивания. Тогда суммарную интенсивность изнашивания $\sum I_h$ одной из двух деталей сопряжений плунжерных или золотниковых пар можно представить в виде:

$$\sum I_h = I_h^{\text{пл}} + I_h^{\text{р}}, \quad (1)$$

где $I_h^{\text{пл}}$ – интенсивность изнашивания в результате пластического оттеснения металла; $I_h^{\text{р}}$ – интенсивность изнашивания в результате микрорезания.

Интенсивность изнашивания в результате пластического оттеснения металла можно определить по формуле:

$$I_h^{\text{пл}} = \frac{\sqrt{\frac{h_{\max}^v}{r}} \left\{ -\ln \left[1 - \frac{h_{\max}}{r} \left(\frac{q_a}{\text{HB}} \right)^{1/v} - \sqrt{\frac{2h_{\max}}{R} \left(\frac{q_a}{\text{HB}} \right)^{1/v} \frac{\sigma_s + 2\tau}{\sigma_s - 2\tau}} \right] \right\}^t}{2(v+1)[\ln(1+\delta)]^t} \times \left(\frac{q_a}{\text{HB}} \right)^{1+\frac{1}{2v}}, \quad (2)$$

где h – глубина внедрения (высота микронеровности), мм; r – радиус пятна контакта, мм; v – эмпирический коэффициент, зависящий от шероховатости поверхности; q_a – давление на номинальную площадь контакта, Па; HB – твердость; R – радиус закругления микровыступов (радиус единичной микронеровности), мм; σ_s – предел текучести, Па; τ – тангенциальная прочность фрикционной связи, Па; t – показатель кривой усталости; δ – разрывное удлинение, %.

Интенсивность изнашивания в результате микрорезания:

$$I_h^{\text{р}} = \frac{\text{tg}\beta}{2(n+1)\text{HB}} \frac{q_a}{\text{HB}}, \quad (3)$$

где β – угол внедрения абразивной частицы в поверхность детали, град.; $n+1$ – число циклов, приводящих к отделению частиц износа.

С учетом формул (1)–(3) выражение для определения суммарной интенсивности изнашивания одной из двух деталей сопряжений плунжерных или золотниковых пар примет вид:

$$\sum I_h = \left[\frac{\sqrt{\frac{h_{\max}^v}{r}} \left\{ -\ln \left[1 - \frac{h_{\max}}{r} \left(\frac{q_a}{\text{HB}} \right)^{1/v} - \sqrt{\frac{2h_{\max}}{R} \left(\frac{q_a}{\text{HB}} \right)^{1/v} \frac{\sigma_s + 2\tau}{\sigma_s - 2\tau}} \right] \right\}^t}{2(v+1)[\ln(1+\delta)]^t} \times \left(\frac{q_a}{\text{HB}} \right)^{1+\frac{1}{2v}} \right] + \left[\frac{\text{tg}\beta}{2(n+1)\text{HB}} \frac{q_a}{\text{HB}} \right]. \quad (4)$$

Анализируя выражение (4), можно сделать вывод о том, что важным фактором, оказывающим влияние на интенсивность износа, является твердость трущихся поверхностей. Поэтому большой научно-практический интерес представляет изучение влияния наноразмерных частиц на микротвердость получаемых покрытий, интенсивность их изнашивания и ресурс сопряжений в целом.

Многие исследователи в своих работах указывают, что основной теоретической базой для объяснения механизма упрочнения нанокomпозиционных покрытий служит теория дислокаций и препятствий. Кроме того, известно, что наноразмерные частицы способствуют уменьшению размеров зерна покрытия, благодаря чему происходит уплотнение матрицы и как следствие – повышение микротвердости всей композиции. Для упрочнения гальвано-химических покрытий необходимо обеспечивать образование оптимального для заданных условий структурного состояния материала путем увеличения числа дислокаций и измельчения зерен покрытий. Это позволяет построить модель упрочнения нанокomпозиционных гальвано-химических покрытий с математической точки зрения (рисунок 1).

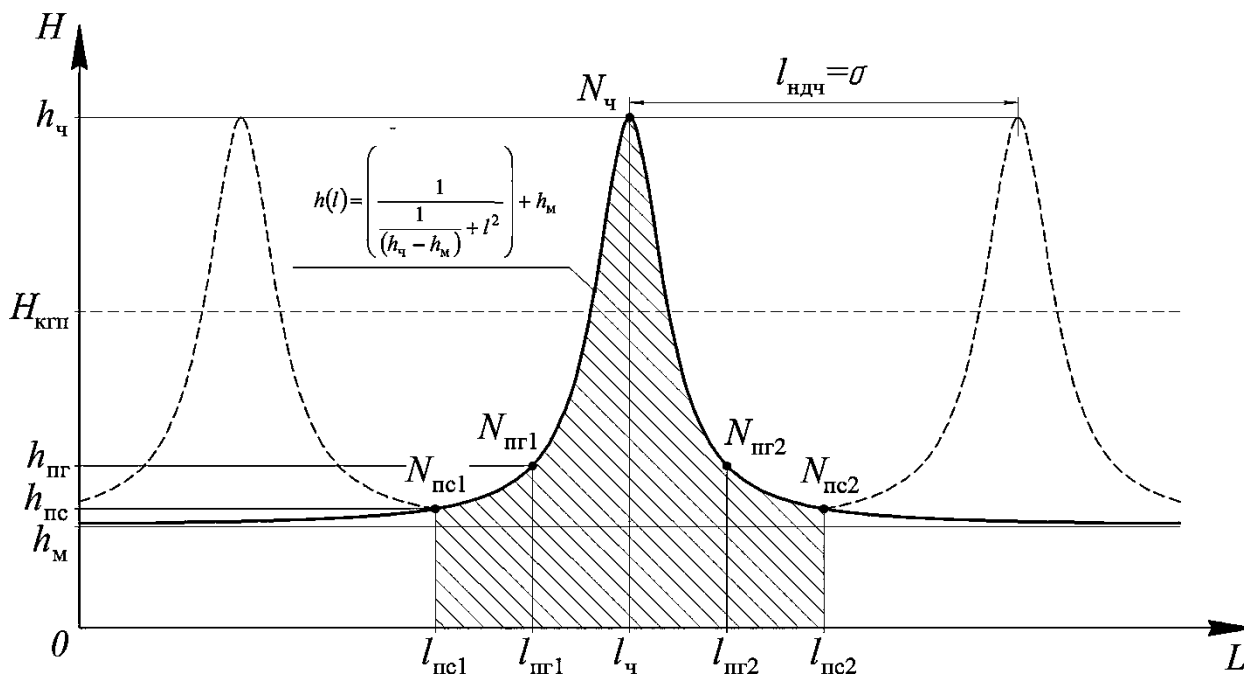


Рисунок 1 – Схема нелинейной физико-математической модели механизма упрочнения нанокomпозиционных покрытий: OH – ось, характеризующая микротвердость элементов в покрытии; h_{ch} , h_m – микротвердость наноразмерных частиц и основного материала покрытия соответственно; H_{ktp} – теоретическая микротвердость нанокomпозиционного покрытия; h_{pg} – микротвердость покрытия в точке перегиба функции; h_{pc} – микротвердость покрытия в точке пересечения двух функций; OL – ось характеризующая расстояние между элементами в покрытии; l_{ch} – координата на оси OL величины h_{ch} ; $l_{ndch} = \sigma$ – расстояние между наноразмерными частицами; l_{pg1-2} , l_{pc1-2} – координаты на оси OL соответствующих величин h_{pg} и h_{pc} ; N_{pc1-2} , N_{pg1-2} , N_{ch} – точки пересечения функций, перегиба функции и наноразмерных частиц соответственно; σ – период эффективной области

Функция, описывающая характер изменения микротвердости, имеет вид:

$$h(l) = \left(\frac{1}{\frac{1}{(h_{\text{ч}} - h_{\text{м}})} + l^2} \right) + h_{\text{м}}, \quad (5)$$

где h и l – переменные.

Модель упрочнения нанокomпозиционных покрытий целесообразно рассматривать в единичном объеме. Для этого использовалась методика исследования объемной модели, полученной вращением графика функции (5) вокруг оси $l=l_{\text{ч}}$ (рисунок 2).

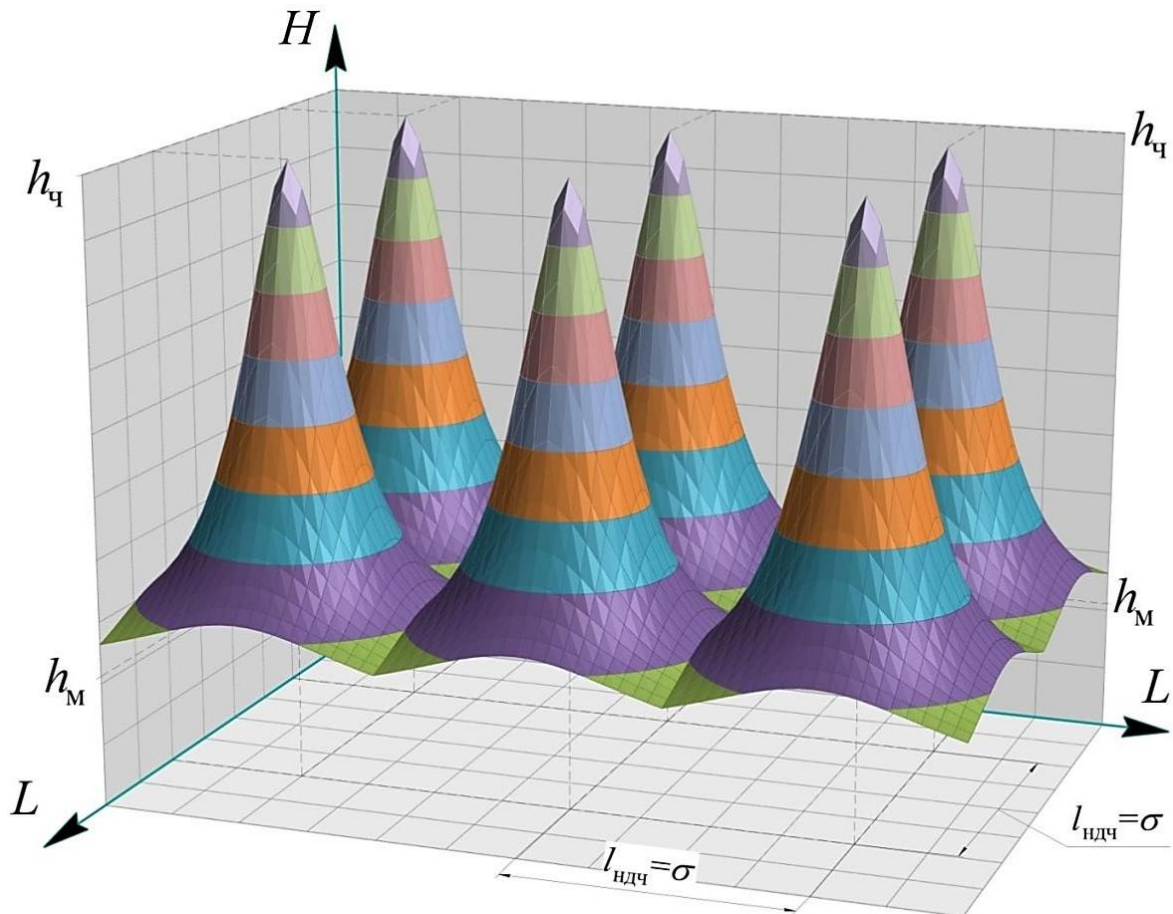


Рисунок 2 – Объемная физико-математическая модель механизма упрочнения нанокomпозиционных покрытий

Для нахождения теоретической микротвердости нанокomпозиционных покрытий были использованы элементы интегрального исчисления. Тогда формулу для определения микротвердости нанокomпозиционного покрытия, учитывающую изменения в объеме, можно представить в виде:

$$H_{\text{кгп}}^{\text{об}} = \frac{\pi \int_{l_{\text{пс1}}}^{l_{\text{пс2}}} \left(\left(\frac{1}{\frac{1}{(h_{\text{ч}} - h_{\text{м}})} + l^2} \right) + h_{\text{м}} \right)^2 dl}{l_{\text{ндч}}}. \quad (6)$$

Пределы интегрирования можно определить следующим образом:

$$l_{\text{пс1-2}} = l_{\text{ч}} \pm \frac{l_{\text{ндч}}}{2}. \quad (7)$$

Расстояние между наноразмерными частицами в нанокпозиционных гальвано-химических покрытиях можно найти по известному выражению:

$$l_{\text{ндч}} = 3,74d_{\text{ч}}a_{\text{v}}^{-1/3}, \quad (8)$$

где $d_{\text{ч}}$ – диаметр частиц, м; a_{v} – содержание частиц в покрытии, %:

$$a_{\text{v}} = \frac{100C_{\text{э}}}{\rho_{\text{ч}}}, \quad (9)$$

где $C_{\text{э}}$ – концентрация частиц в электролите (растворе), кг/л; $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц, кг/м³.

С учетом формул (6)–(9) выражение для определения микротвердости нанокпозиционных гальвано-химических покрытий примет вид:

$$H_{\text{кгп}}^{\text{об}} = \frac{\pi \int_{l_{\text{пс1}}}^{l_{\text{пс2}}} \left(\left(\frac{1}{\frac{1}{(h_{\text{ч}} - h_{\text{м}})} + l^2} \right) + h_{\text{м}} \right)^2 dl}{3,74d_{\text{ч}} \left(\frac{100C_{\text{э}}}{\rho_{\text{ч}}} \right)^{-1/3}}. \quad (10)$$

Таким образом, используя полученную зависимость (10) можно определить микротвердость нанокпозиционных покрытий, а, следовательно, и твердость одной из двух сопрягаемых деталей на которую нанесено покрытие.

При расчете интенсивности изнашивания деталей с нанокпозиционными покрытиями по формуле (4) следует учитывать то, что по выражению (10) определяется микротвердость покрытия, и при использовании рассчитанного значения микротвердости его необходимо перевести в значение твердости шкалы НВ согласно справочным данным, связывающим различные шкалы твердости.

Ресурс сопряжения плунжерной или золотниковой пары можно определить по выражению:

$$T_{\text{пары}} = \frac{I_{\text{пр}}}{\left(\sum I'_h + \sum I''_h\right)V_{\text{тр}}} \quad (11)$$

где $I_{\text{пр}}$ – предельный износ сопряжения, мм; $V_{\text{тр}}$ – скорость относительного перемещения поверхностей трения, мм/ч; $\sum I'_h$ – интенсивность изнашивания втулки плунжера или корпуса золотника; $\sum I''_h$ – интенсивность изнашивания плунжера или золотника.

Таким образом, методика теоретической оценки ресурса сопряжения, детали которого восстановлены с применением нанокomпозиционных гальвано-химических покрытий предусматривает расчет микротвердости наносимого покрытия по формуле (10) и суммарных интенсивностей изнашивания сопрягаемых деталей по формуле (4).

Третья глава «Программа и методики экспериментальных исследований» содержит общую структурно-логическую схему, методики исследований и статистической обработки результатов исследований.

Для получения нанокomпозиционных покрытий на основе хрома, железа и никеля была выбрана следующая группа наноразмерных частиц: Al_2O_3 , AlN , SiC , TiC , WC , $\text{K}_2\text{O} \cdot n\text{TiO}_2$. Размер нанодисперсных частиц – 10–100 нм. Внешний вид наноразмерных частиц, на примере оксида алюминия, представлен на рисунке 3.

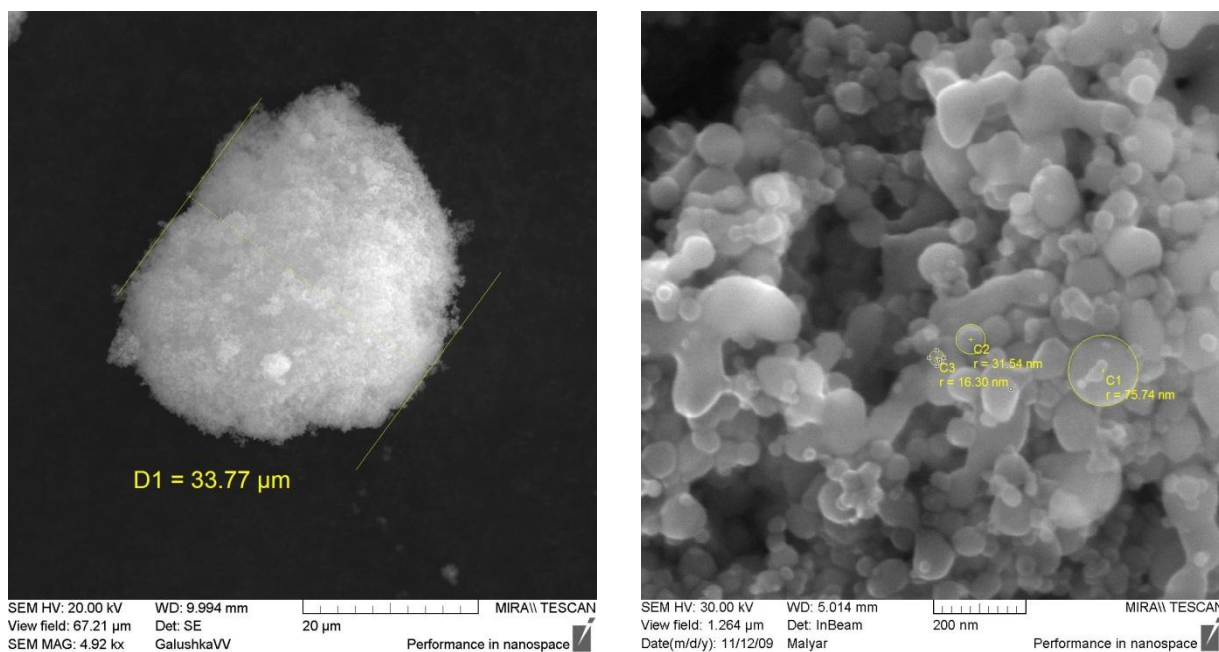


Рисунок 3 – Наноразмерные частицы оксида алюминия

При проведении экспериментов по выбору наиболее эффективной упрочняющей фазы концентрация наноразмерных частиц составляла 3 г/л.

Для повышения седиментационной устойчивости растворов с наноразмерными частицами, покрытия на образцы наносили на лабораторной установке (рисунок 4) под воздействием ультразвука.



Рисунок 4 – Лабораторная гальваническая установка

Степень эффективности материала наноразмерной фазы оценивали по величине микротвердости получаемого покрытия, которую определяли с помощью микротвердомера DuraScan 20 на металлографических шлифах.

Для испытания получаемых покрытий на прочность сцепления с основой были выбраны методы изгиба и изменения температур согласно ГОСТ 9.302–88.

Морфологию и структуру получаемых покрытий исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Mira II Tescan.

Плотность дислокаций в покрытиях ρ рассчитывали по формуле Вильямсона – Смоллмена:

$$\rho = \frac{3}{D^2}, \quad (12)$$

где D – размер зерна металла, см.

С целью определения элементного состава получаемых покрытий был проведен эмиссионный анализ образцов по дифракции отраженных электронов с помощью исследовательского комплекса Mira II Tescan.

Сравнительные ускоренные трибологические испытания образцов с покрытиями проводили в условиях трения скольжения на модернизированной машине трения МИ-1М. Контактное взаимодействие образцов осуществляли по схеме «ролик – колодка». Испытаниям подвергали образцы без покрытий и имеющие нанокпозиционные и базовые покрытия, согласно ГОСТ 23.224–86.

Для моделирования сопряжения деталей плунжерной пары ТНВД колодки и ролики изготавливали из стали ШХ15 ГОСТ 801–78 и подвергали их термообработке до твердости 55–60 HRC. Испытания проводили в двух средах: на чистом дизельном топливе и на дизельном топливе с добавлением частиц кварца размером 3–5 мкм при концентрации абразива 3 % по массе топлива.

Для моделирования сопряжения деталей золотниковых пар гидрораспределителей колодки изготавливали из серого чугуна СЧ 20 ГОСТ 1412–85, ролики – из стали 15Х ГОСТ 4543–2016 с термообработкой до твердости 55–60 HRC. Испытания проводили в двух средах: на чистом и загрязненном индустриальном масле И-20 (ГОСТ 20799–88). В качестве загрязнителя также использовали кварцевый порошок с размерами частиц 3–5 мкм при концентрации 3 % по массе масла.

Основная нагрузка испытаний составляла 850 Н. Износ образцов определяли взвешиванием на аналитических весах HR-250AZG 1-го класса точности.

Коррозионные испытания исследуемых покрытий проводили согласно ГОСТ 9.308–85 при переменном погружении в 3%-й раствор хлористого натрия (NaCl) ГОСТ 4233–77. Продолжительность испытаний составляла 360 ч. Коррозионную стойкость покрытий оценивали с помощью аналитических весов HR-250AZG по потере массы образцов после удаления продуктов коррозии.

Для испытания на износостойкость восстановленных плунжерных пар топливных насосов дизелей ЯМЗ-238НДЗ был применен метод ускоренных износных испытаний, проводимых с добавлением абразивных частиц в дизельное топливо, используя стенды КИ-22205-01 ГОСНИТИ. На стендах были смонтированы термокамера и смеситель, позволяющие поддерживать температуру и заданную загрязненность топлива. Испытания проводили в два этапа: 1 – обкатка в течение 10 ч на чистом дизельном топливе; 2 – основные испытания на дизельном топливе, содержащем абразивные

частицы кварца с размерами 3–5 мкм при концентрации абразива 15 г/т. Время испытаний – 130 ч. Через каждые 10 ч фиксировали пусковую цикловую подачу топлива.

Испытания гидрораспределителей Р160 и Р80 проводили на стендах КИ-4815М. Ускоренные испытания распределителей проводили, применяя кварцевый порошок с размером частиц 3–5 мкм при концентрации 0,08 % по массе масла. Продолжительность испытаний каждого золотника составляла 40 ч. Испытания проходили в 2 этапа. Первый этап заключался в приработке каждого золотника в течение 8 ч. Второй этап проводили при основных режимах работы – продолжительность – 32 ч. Золотниковые пары проверяли на герметичность по утечкам каждые 8 ч испытаний с помощью средств контроля КИ-28084М.

Эксплуатационные сравнительные испытания топливных насосов с восстановленными и серийными плунжерными парами проводили в ИП Глава КФХ «Волков В.В.» и ООО «Агрофирма «Рубеж» на тракторах К-700А, выполняющих различные сельскохозяйственные работы. В процессе эксплуатационных испытаний контролировали наработку и изменение пусковой цикловой подачи топлива каждые 250 мото-ч на стенде КИ-22205-01 ГОСНИТИ.

Эксплуатационные сравнительные испытания гидрораспределителей Р160 и Р80 с восстановленными и серийными золотниками проводили в К(Ф)Х «Лавровское», К(Ф)Х «Харенко В.В.», СХПК «Горецкое», ИП Глава К(Ф)Х «Волков В.В.» и ООО «Агрофирма «Рубеж». Экспериментальные гидрораспределители были установлены на тракторах ДТ-75М, МТЗ-80, Т-150К, К-700А, которые выполняли различные типы сельскохозяйственных работ. В процессе эксплуатационных испытаний контролировали наработку тракторов и техническое состояние гидрораспределителей. Через каждые 125 мото-ч проверяли величину утечек в золотниковых парах гидрораспределителей с помощью комплекта средств КИ-28084М.

Обоснование необходимого минимального числа экспериментальных узлов, сбор и статистическую обработку результатов испытаний проводили на основе рекомендаций РД 50-690-89.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» приведены результаты лабораторных, стендовых и эксплуатационных испытаний, а также прогнозирование ресурса топливных насосов дизелей ЯМЗ-238НДЗ и гидрораспределителей Р160 и Р80 с плунжерными и золотниковыми парами, восстановленными нанокompозиционными гальвано-химическими покрытиями.

По результатам измерения микротвердости полученных покрытий были определены наиболее эффективные наноразмерные порошкообразные материалы для каждого из них. Для нанокпозиционного электролитического хромирования – Al_2O_3 , нанокпозиционного электролитического железнения – AlN , нанокпозиционного химического никелирования – $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} \cdot n\text{TiO}_2$. Все последующие эксперименты проводили только с данными наноразмерными материалами.

Определение оптимальных режимов нанесения покрытий и концентраций наноразмерных материалов проводили с помощью метода математического планирования эксперимента. В качестве параметра оптимизации была принята микротвердость получаемых покрытий. В качестве факторов, оказывающих наибольшее влияние на параметр оптимизации, были выбраны:

- для нанокпозиционного электролитического хромирования и железнения – концентрация наноразмерных частиц x_1 , температура электролита x_2 , плотность тока x_3 ;
- для нанокпозиционного химического никелирования – концентрация наноразмерных частиц оксида алюминия x_1 , концентрация наноразмерных частиц полититаната калия x_2 , температура последующей термической обработки x_3 .

Проведенные расчеты позволили получить уравнения регрессии с кодированными и физическими переменными, по которым были построены поверхности откликов. На рисунке 5, для примера, представлена поверхность отклика исследуемого процесса получения нанокпозиционного покрытия на основе хрома.

В результате математического планирования экспериментов и статистической обработки полученных результатов было установлено, что наибольшая микротвердость нанокпозиционного электролитического покрытия на основе хрома 14,32 ГПа достигается при температуре электролита 50 °С, плотности тока 59 А/дм² и концентрации наноразмерных частиц оксида алюминия в электролите 3,2 г/л, что в 1,49 раза выше микротвердости базового покрытия хрома.

Наибольшая микротвердость нанокпозиционного электролитического покрытия на основе железа 7,28 ГПа достигается при температуре электролита 70 °С, плотности тока 21 А/дм² и концентрации наноразмерных частиц нитрида алюминия в электролите 3,1 г/л, что в 1,24 раза выше микротвердости базового покрытия железа. Наибольшая микротвердость нанокпозиционного химического покрытия на основе никеля 9,64 ГПа достигается при концентрации частиц оксида алюминия 3,2

г/л, концентрации частиц полититаната калия 4,1 г/л и температуре последующей термической обработки 350 °С, что в 1,85 раза выше микротвердости базового покрытия химического никеля.

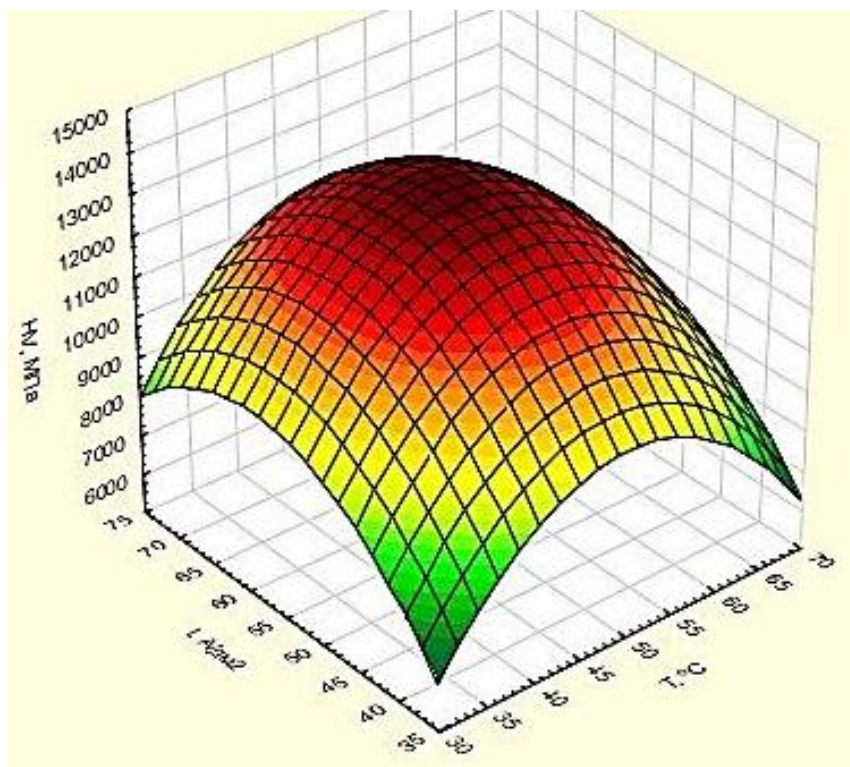


Рисунок 5 –
Поверхность отклика
исследуемого
процесса получения
нанокomпозиционных
покрытий на основе
хрома

Испытания покрытий на прочность сцепления с основой показали, что прочность сцепления нанокomпозиционных покрытий на основе хрома, железа и никеля с основным металлом превышает прочность слоя самих покрытий на разрыв и удовлетворяет требованиям ГОСТ 9.302–88.

Результаты исследования морфологии полученных покрытий представлены на рисунке 6.

Как видно из представленных данных, внешний вид покрытий достаточно сильно различается. Базовые покрытия не имеют на своей поверхности каких-либо включений. Нанокomпозиционные гальвано-химические покрытия имеют большое количество включений различного размера по всей поверхности.

Средние значения размеров зерен, минимальных плотностей дислокаций рассчитанных по формуле (12) и микротвердостей покрытий представлены в таблице 1.

В результате эмиссионного спектрального анализа были получены спектрограммы базовых и нанокomпозиционных покрытий на основе хрома, железа и никеля, по которым рассчитано процентное содержание основных элементов в покрытиях (таблица 2).

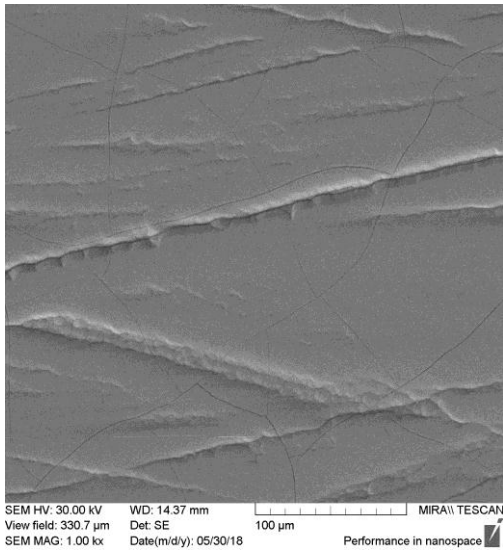
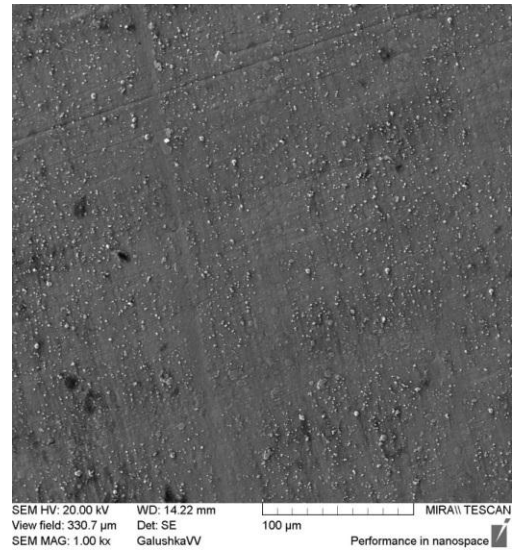
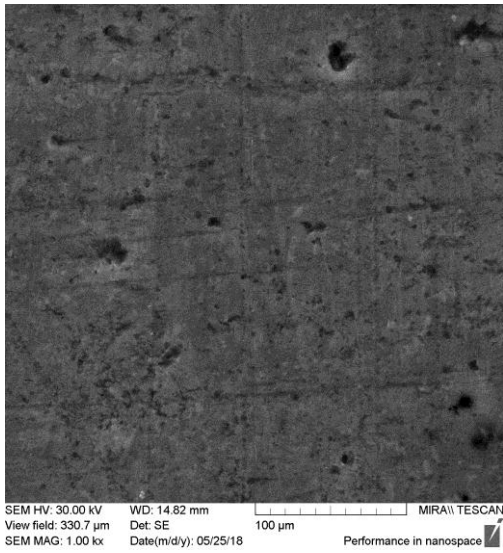
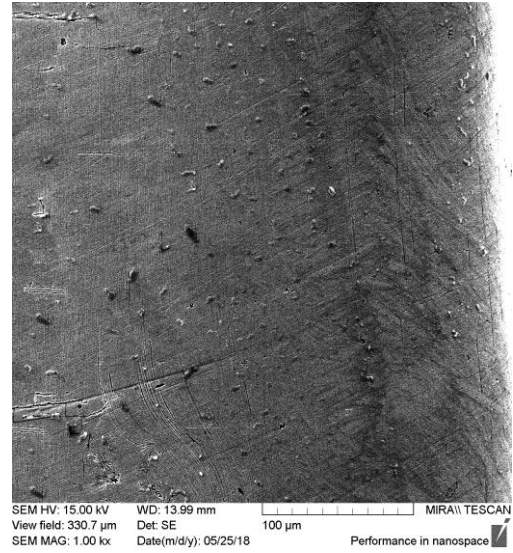
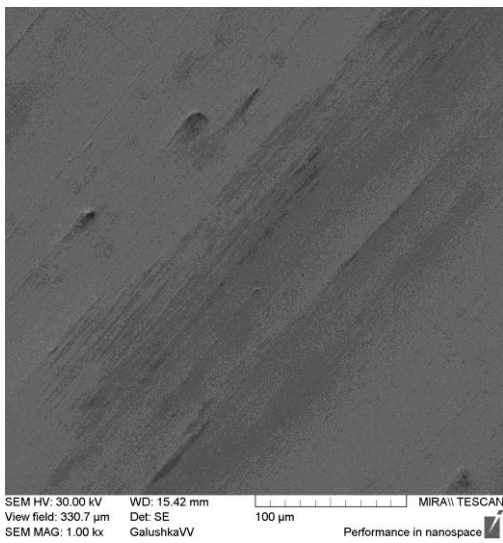
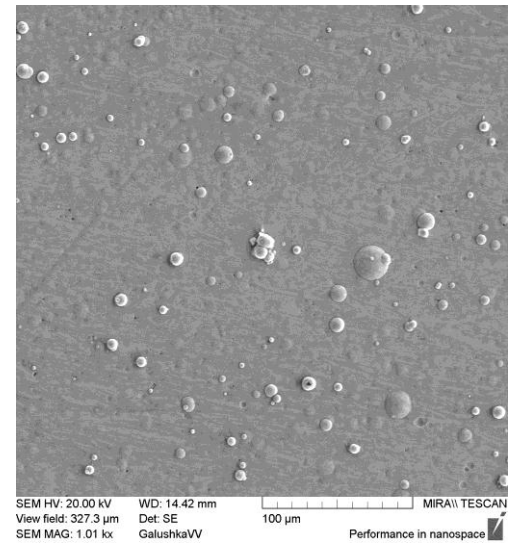
*a**б**в**з**д**е*

Рисунок 6 – Морфология покрытий: *a, в, д* – базовые покрытия хрома, железа и химического никеля соответственно; *б, з, е* – нанокпозиционные покрытия на основе хрома, железа и химического никеля соответственно

Таблица 1 – Средний размер зерна, минимальная плотность дислокаций и средняя микротвердость покрытий

Вид покрытия	Средний размер зерна, см	Плотность дислокаций, см ⁻²	Среднее значение микротвердости, ГПа
Базовое на основе хрома	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^8$	9,6
Нанокпозиционное на основе хрома	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^8$	14,32
Базовое на основе железа	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^6$	5,86
Нанокпозиционное на основе железа	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^7$	7,28
Базовое на основе никеля	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^7$	5,22
Нанокпозиционное на основе никеля	$9,6 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^8$	9,64

Таблица 2 – Содержание основных элементов в покрытиях, % по массе

Элемент в покрытии	Базовое покрытие на основе хрома	Нанокпозиционное покрытие на основе хрома	Базовое покрытие на основе железа	Нанокпозиционное покрытие на основе железа	Базовое покрытие на основе никеля	Нанокпозиционное покрытие на основе никеля
Cr	91,96	79,32	–	–	–	–
C	2,24	1,18	5,55	6,52	2,12	2,20
Cl	1,12	1,27	0,12	0,27	–	–
Fe	1,86	0,46	85,18	80,55	–	–
O	0,34	3,53	6,15	7,45	2,26	6,59
Al	–	2,79	–	1,26	–	1,24
N	–	–	–	0,95	–	–
Ni	–	–	–	–	74,07	62,19
P	–	–	–	–	19,83	10,56
K	–	–	–	–	–	2,40
Ti	–	–	–	–	–	10,35

Как видно из представленных данных, нанокпозиционные гальвано-химические покрытия содержат элементы добавляемых наноразмерных частиц, которые отсутствуют в базовых покрытиях. Это подтверждает предположение о том, что наноразмерные частицы внедряются в покрытия, что и приводит к изменению физико-механических свойств последних.

Результаты лабораторных испытаний образцов на износостойкость представлены на рисунках 7–9.

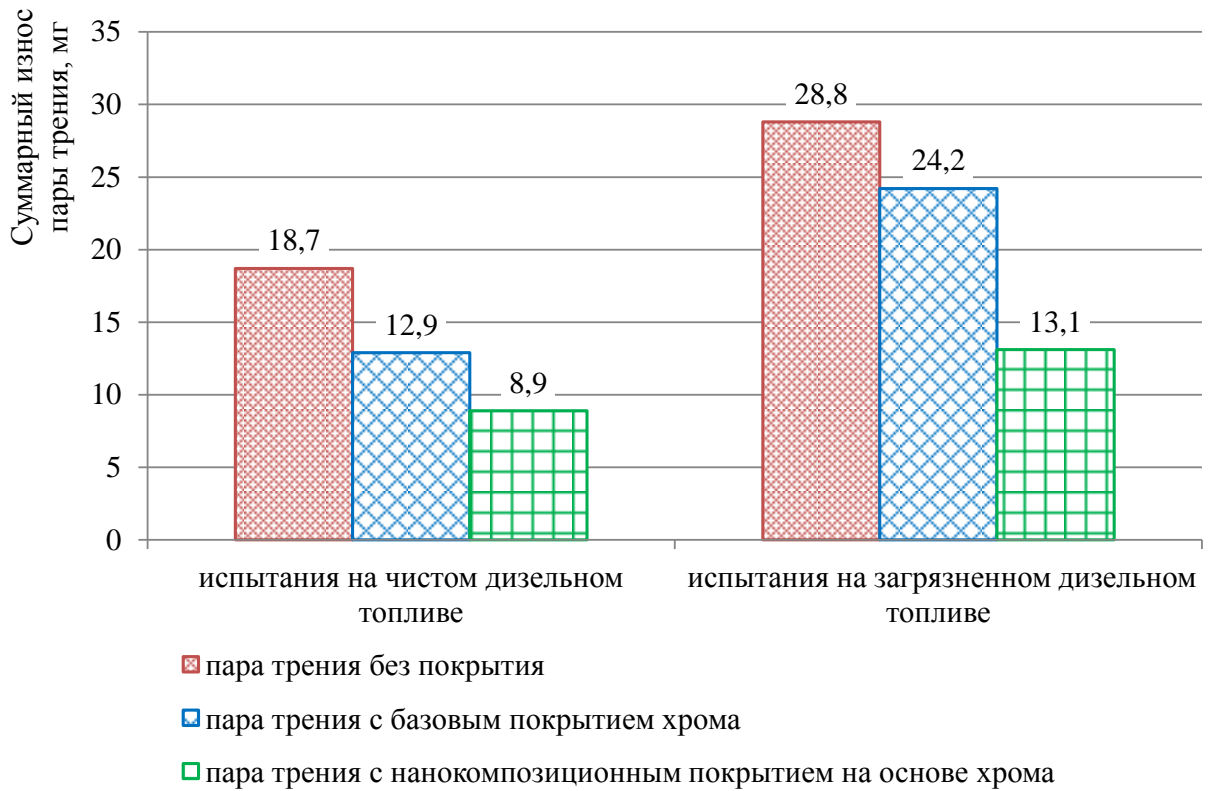


Рисунок 7 – Суммарный износ пар трения после проведения испытаний образцов с покрытиями на основе хрома

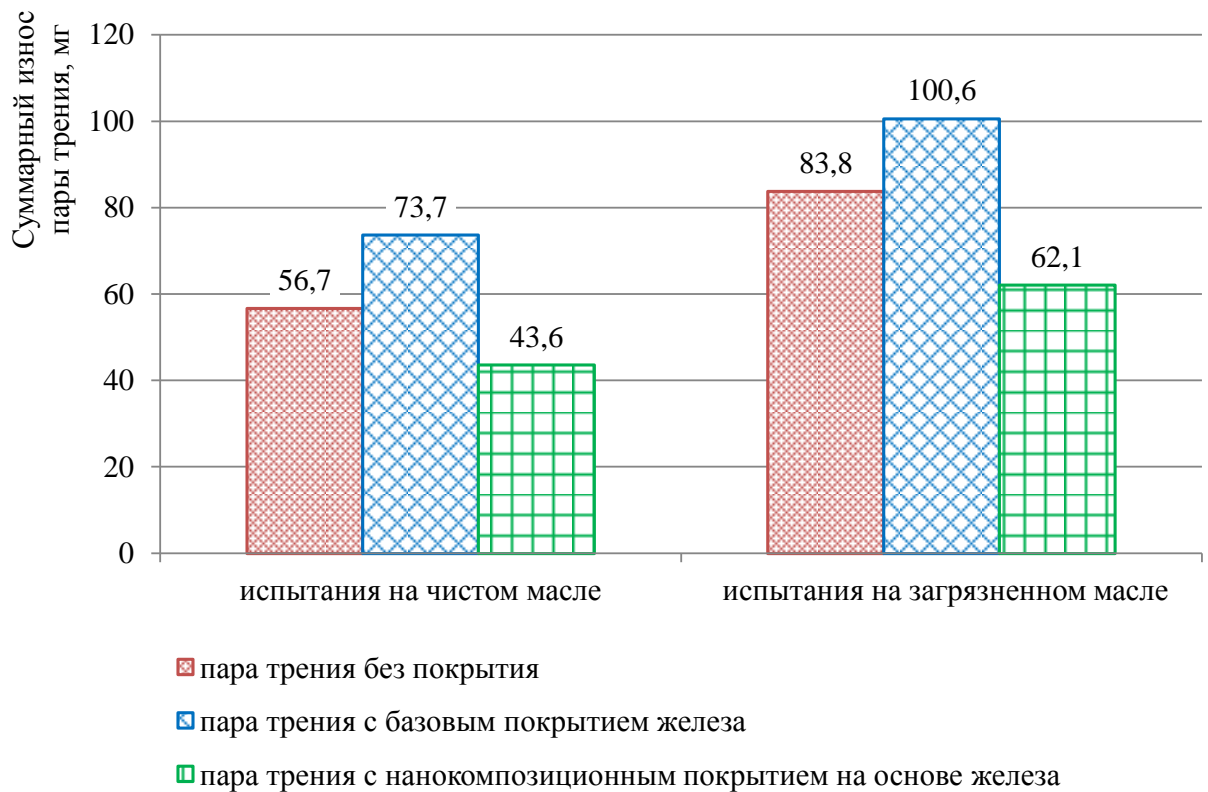


Рисунок 8 – Суммарный износ пар трения после проведения испытаний образцов с покрытиями на основе железа

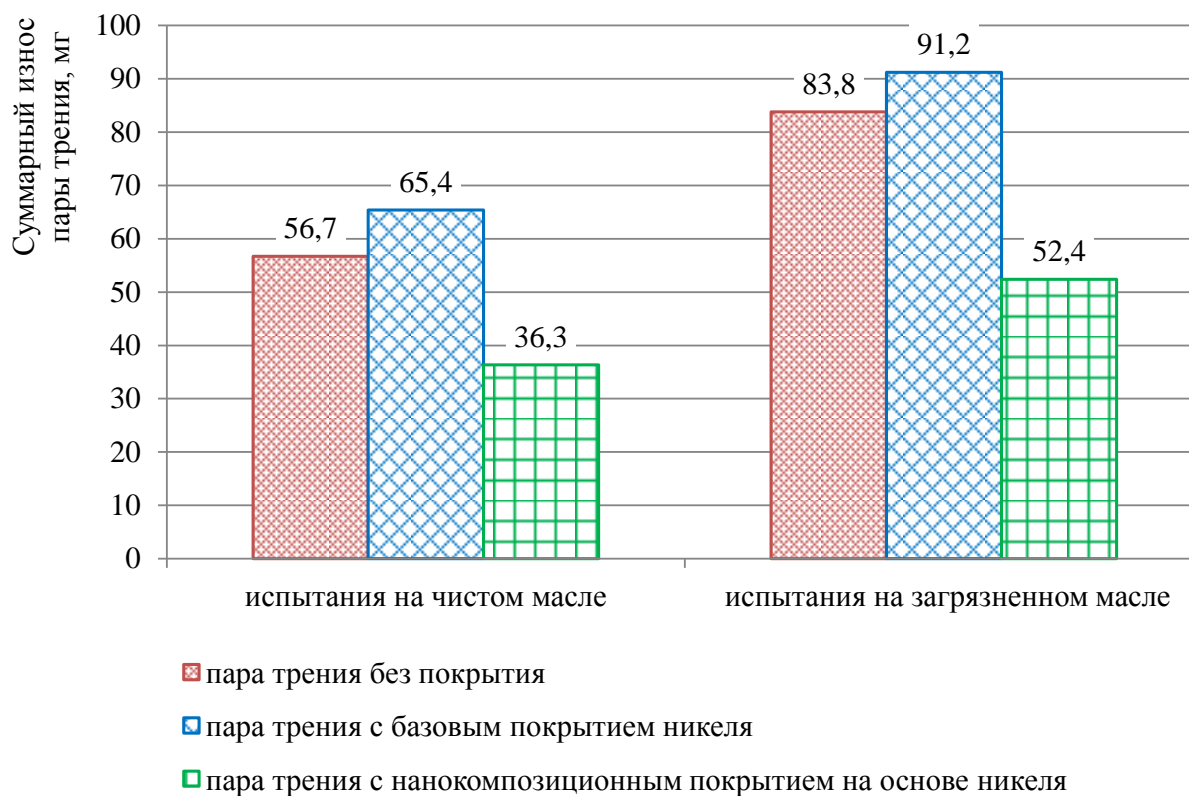


Рисунок 9 – Суммарный износ пар трения после проведения испытаний образцов с покрытиями на основе химического никеля

В результате проведенных трибологических испытаний и статистической обработки полученных результатов было установлено, что нанокomпозиционные покрытия по сравнению с соответствующими базовыми покрытиями обладают износостойкостью выше в 1,3-2,2 раза за счет внедрения в них наноразмерных частиц с высокой микротвердостью.

Результаты коррозионных испытаний образцов с покрытиями представлены в таблице 3.

Как видно из представленных данных, нанокomпозиционные покрытия по сравнению с соответствующими базовыми покрытиями обладают коррозионной стойкостью выше в 1,26-1,86 раза.

Результаты стендовых испытаний представлены на рисунках 10–12. Из представленных на рисунке 10 данных видно, что по окончании испытаний цикловая пусковая подача плунжерных пар, восстановленных нанокomпозиционным электролитическим хромированием, снизилась с 210 до 194 мм³/цикл, или в среднем на 7,6 %, в то время как восстановленных базовым хромированием – с 210 до 188 мм³/цикл (в среднем на 10,5 %), а серийных – с 210 до 181 мм³/цикл (в среднем на 13,8 %).

По окончании испытаний величина утечек у гидрораспределителей P160 с золотниковыми парами, восстановленными нанокomпозиционным железнением, составила в среднем 19,6 см³/мин, что в 1,7 раза меньше, чем в

гидрораспределителях, золотниковые пары которых были восстановлены базовым железнением, и в 1,3 раза меньше, чем в гидрораспределителях с серийными золотниками.

Таблица 3 – Результаты коррозионных испытаний

Образец	Масса образца до испытания, г	Масса образца после испытания, г	Потеря массы после испытаний, г
Без покрытий	23,49	23,01	0,48
<i>Нанокмпозиционное электролитическое покрытие на основе хрома</i>			
С базовым покрытием	24,68	24,55	0,13
С нанокмпозиционным покрытием	25,47	25,39	0,07
<i>Нанокмпозиционное электролитическое покрытие на основе железа</i>			
С базовым покрытием	27,64	26,77	0,87
С нанокмпозиционным покрытием	29,12	28,59	0,53
<i>Нанокмпозиционное химическое покрытие на основе никеля</i>			
С базовым покрытием	32,64	32,30	0,34
С нанокмпозиционным покрытием	31,18	30,91	0,27

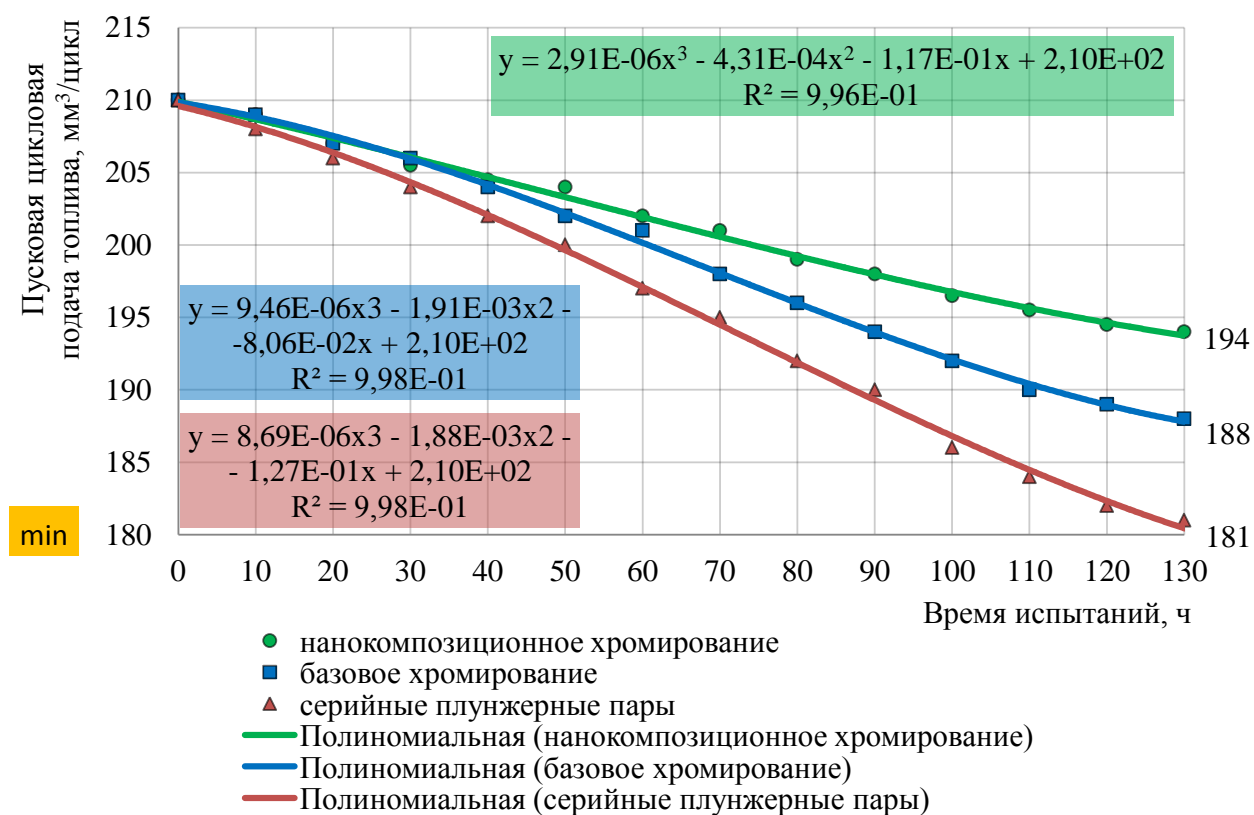


Рисунок 10 – Изменение пусковой цикловой подачи топлива в процессе стендовых испытаний ТНВД дизеля ЯМЗ-238НДЗ

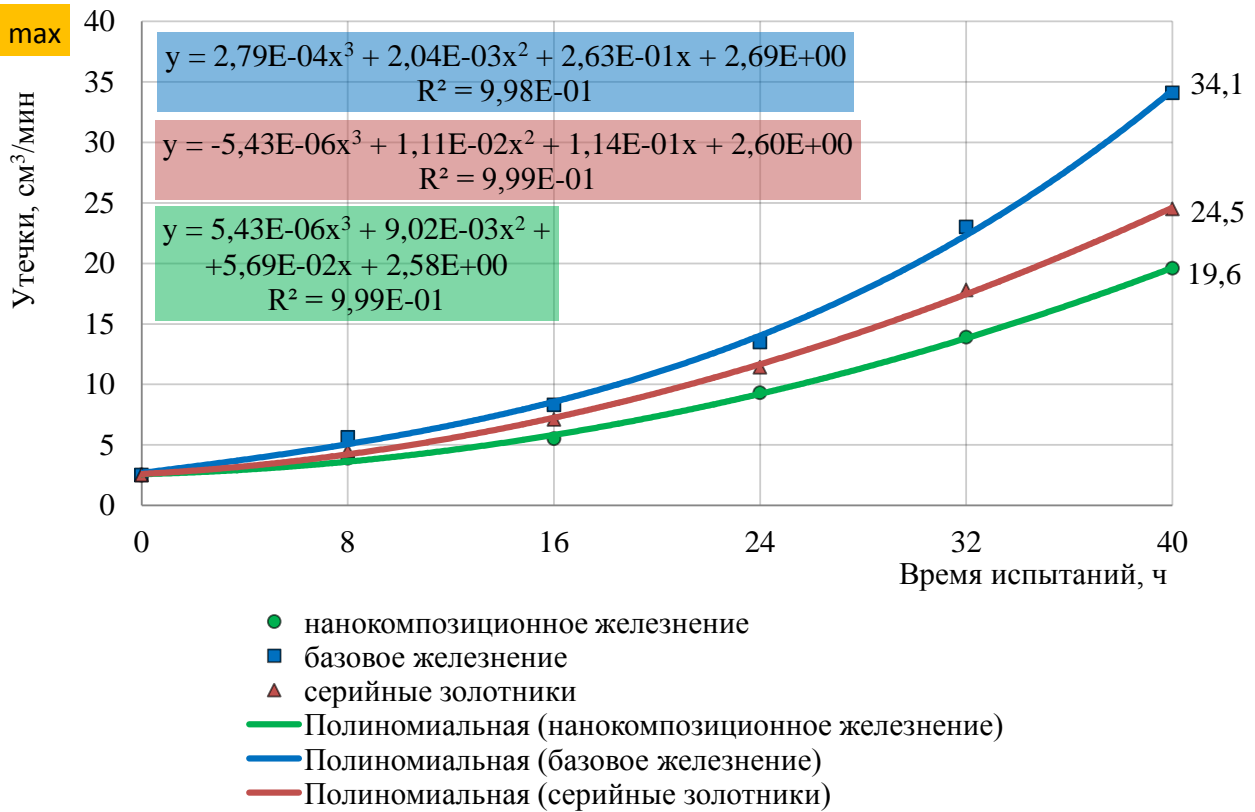


Рисунок 11 – Изменение утечек в золотниковых парах в процессе стендовых испытаний гидрораспределителей Р-160

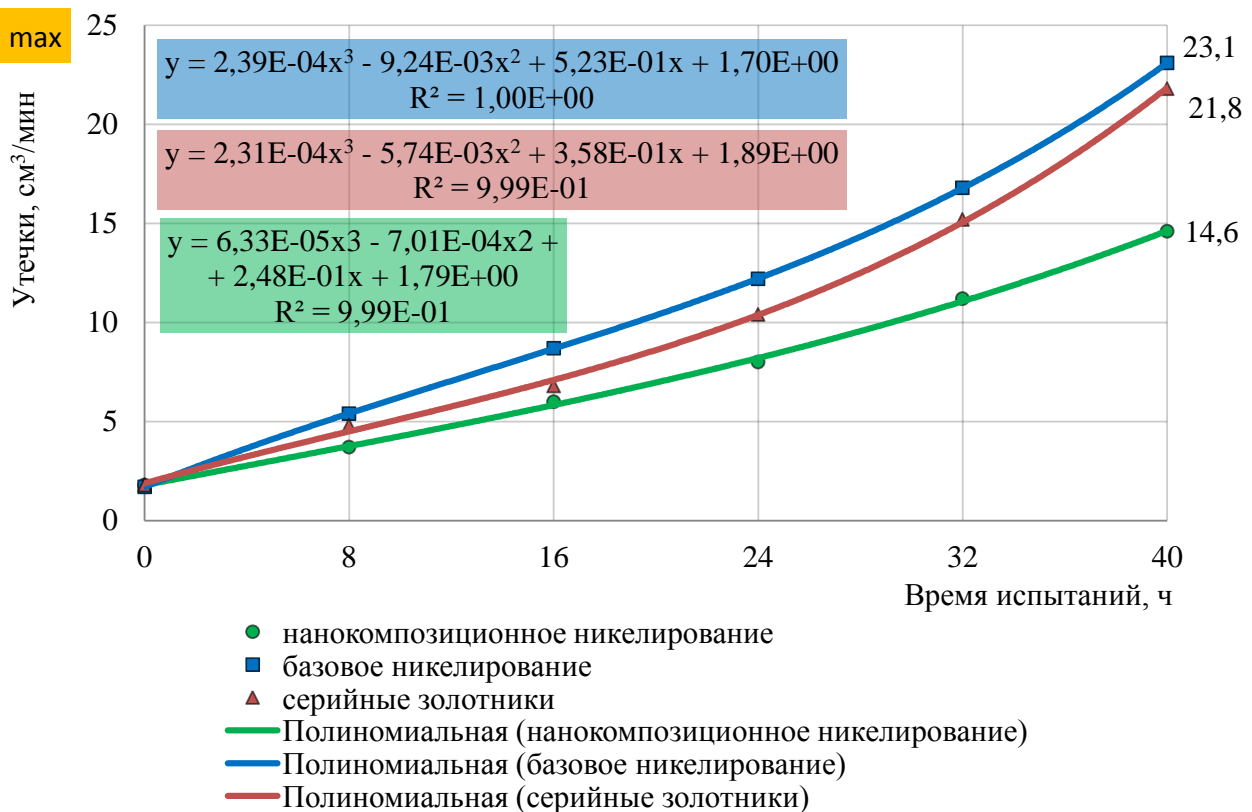


Рисунок 12 – Изменение утечек в золотниковых парах в процессе стендовых испытаний гидрораспределителей Р80

По окончании испытаний величина утечек у гидрораспределителей Р80 с золотниковыми парами, восстановленными нанокпозиционным химическим никелированием, составила в среднем 14,6 см³/мин, что в 1,6 раза меньше, чем в гидрораспределителях, золотниковые пары которых были восстановлены базовым химическим никелированием, и в 1,5 раза меньше, чем в гидрораспределителях с серийными золотниками.

Результаты эксплуатационных испытаний представлены на рисунках 13–15.

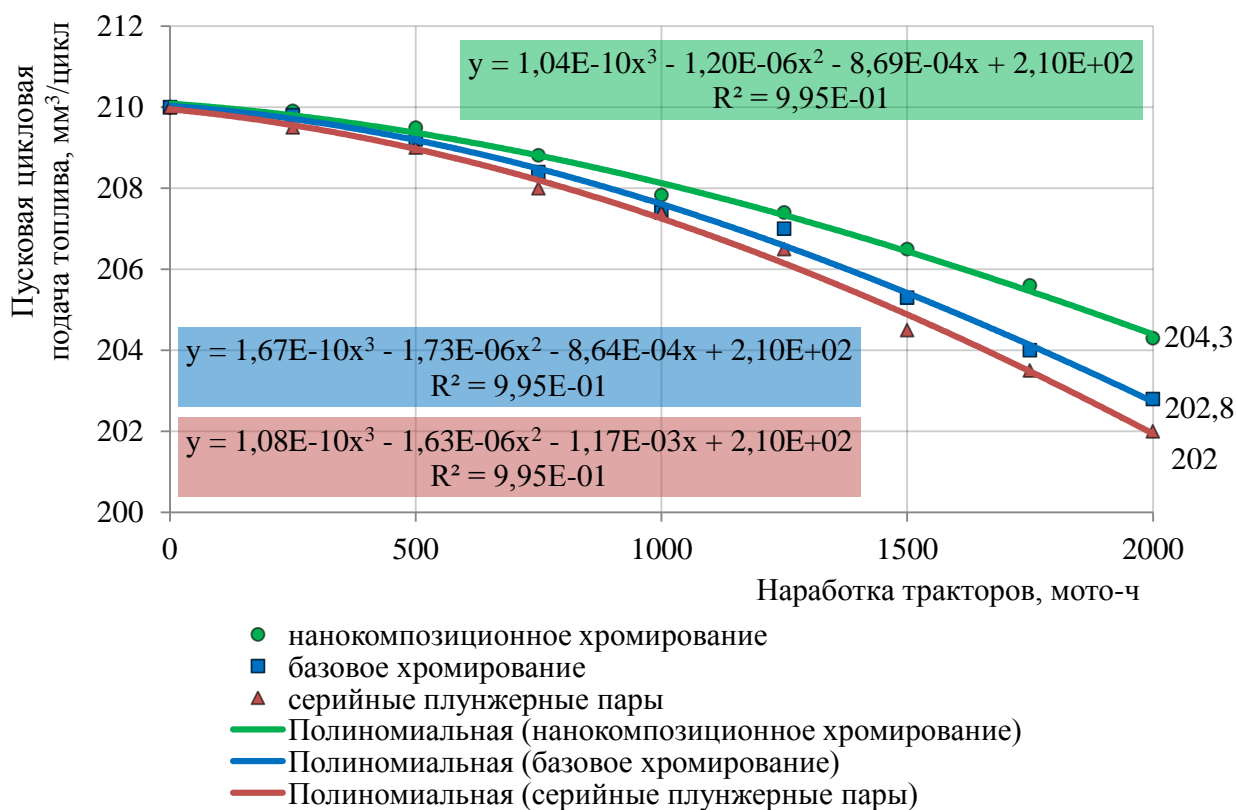


Рисунок 13 – Изменение пусковой цикловой подачи топлива в процессе эксплуатационных испытаний ТНВД дизеля ЯМЗ-238НДЗ

По окончании проведения испытаний было установлено, что снижение пусковой цикловой подачи топлива у ТНВД с плунжерными парами, восстановленными нанокпозиционным электролитическим хромированием, в среднем в 1,1 раза меньше, чем у ТНВД с плунжерными парами, восстановленными базовым хромированием, и в 1,4 раза меньше, чем у ТНВД с серийными плунжерными парами.

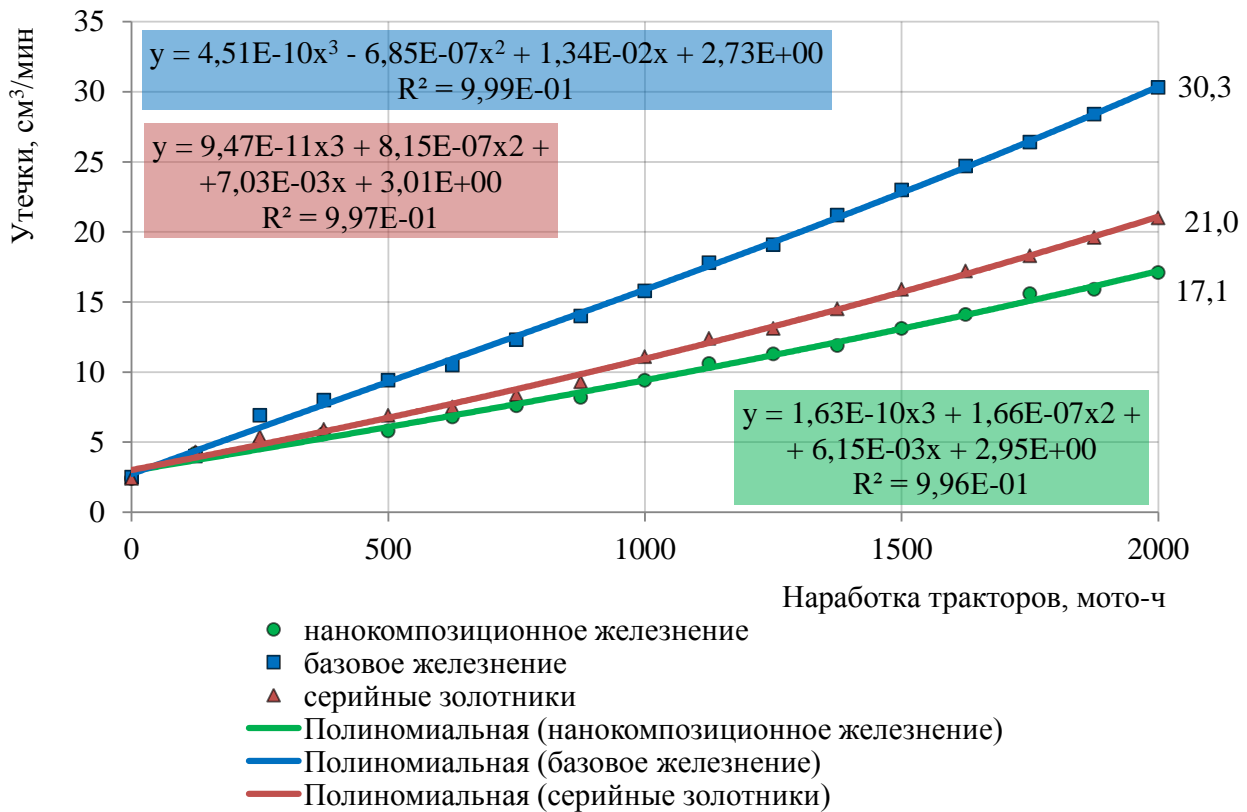


Рисунок 14 – Изменение утечек в золотниковых парах в процессе эксплуатационных испытаний гидрораспределителей Р-160

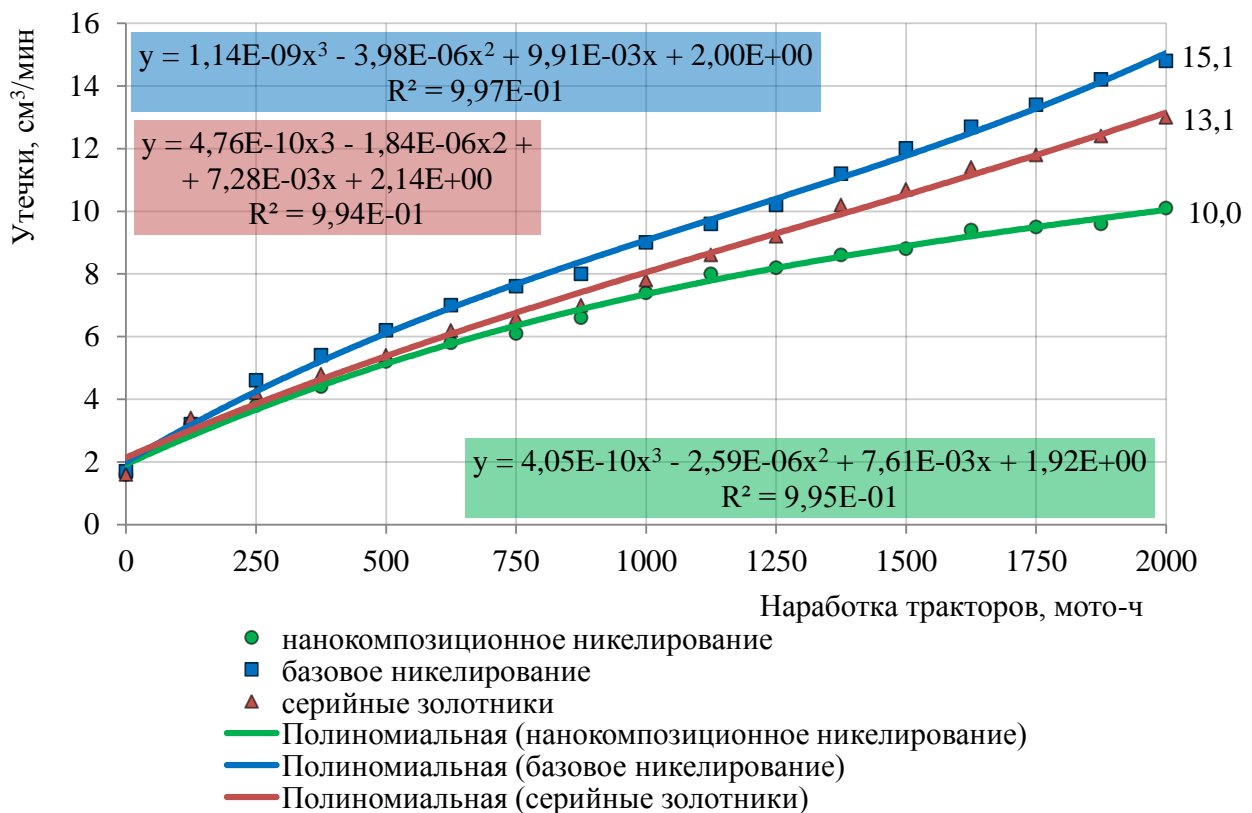


Рисунок 15 – Изменение утечек в золотниковых парах в процессе эксплуатационных испытаний гидрораспределителей Р-80

При наработке тракторов примерно 2000 мото-ч утечки в гидрораспределителях Р160, золотниковые пары которых были восстановлены нанокпозиционным электролитическим железнением, в среднем в 1,8 раза меньше, чем в гидрораспределителях, золотниковые пары которых были восстановлены базовым железнением, и в 1,2 раза меньше, чем в гидрораспределителях с серийными золотниками.

При наработке тракторов порядка 2000 мото-ч утечки в гидрораспределителях Р80, золотниковые пары которых были восстановлены нанокпозиционным химическим никелированием, в среднем в 1,5 раза меньше, чем в гидрораспределителях, золотниковые пары которых были восстановлены базовым химическим никелированием, и в 1,3 раза меньше, чем в гидрораспределителях с серийными золотниками.

По результатам стендовых и эксплуатационных испытаний были сформированы статистические ряды и определены параметры законов распределения для каждого типа агрегатов. Статистические показатели результатов эксплуатационных испытаний представлены в таблице 4, где \bar{t} – среднее значение показателя надежности, σ_t – среднее квадратическое отклонение, $t_{см}$ – смещение рассеивания, V – коэффициент вариации.

Таблица 4 – Статистические показатели результатов эксплуатационных испытаний

Вид покрытия	Статистические показатели			
	\bar{t}	σ_t	$t_{см}$	V
ТНВД дизеля ЯМЗ-238НДЗ				
Серийные плунжерные пары	201,94	0,26	201,10	0,297
Базовое хромирование	202,80	0,21	202,10	0,289
Нанокпозиционное хромирование	204,19	0,27	203,24	0,284
Гидрораспределитель Р160				
Серийные золотниковые пары	20,98	0,21	20,28	0,291
Базовое железнение	30,35	0,13	29,93	0,298
Нанокпозиционное железнение	17,12	0,14	16,62	0,282
Гидрораспределитель Р80				
Серийные золотниковые пары	13,05	0,12	12,63	0,298
Базовое никелирование	15,10	0,07	14,86	0,291
Нанокпозиционное никелирование	10,09	0,16	9,51	0,284

Для выравнивания полученной опытной информации результатов стендовых и эксплуатационных испытаний выбран закон нормального распределения, так как, во всех случаях, коэффициент вариации $\nu < 0,3$.

Для прогнозирования остаточных ресурсов агрегатов был выбран динамический графический метод прогнозирования с помощью программы Microsoft Excel. Результаты прогнозирования представлены на рисунках 16–18.

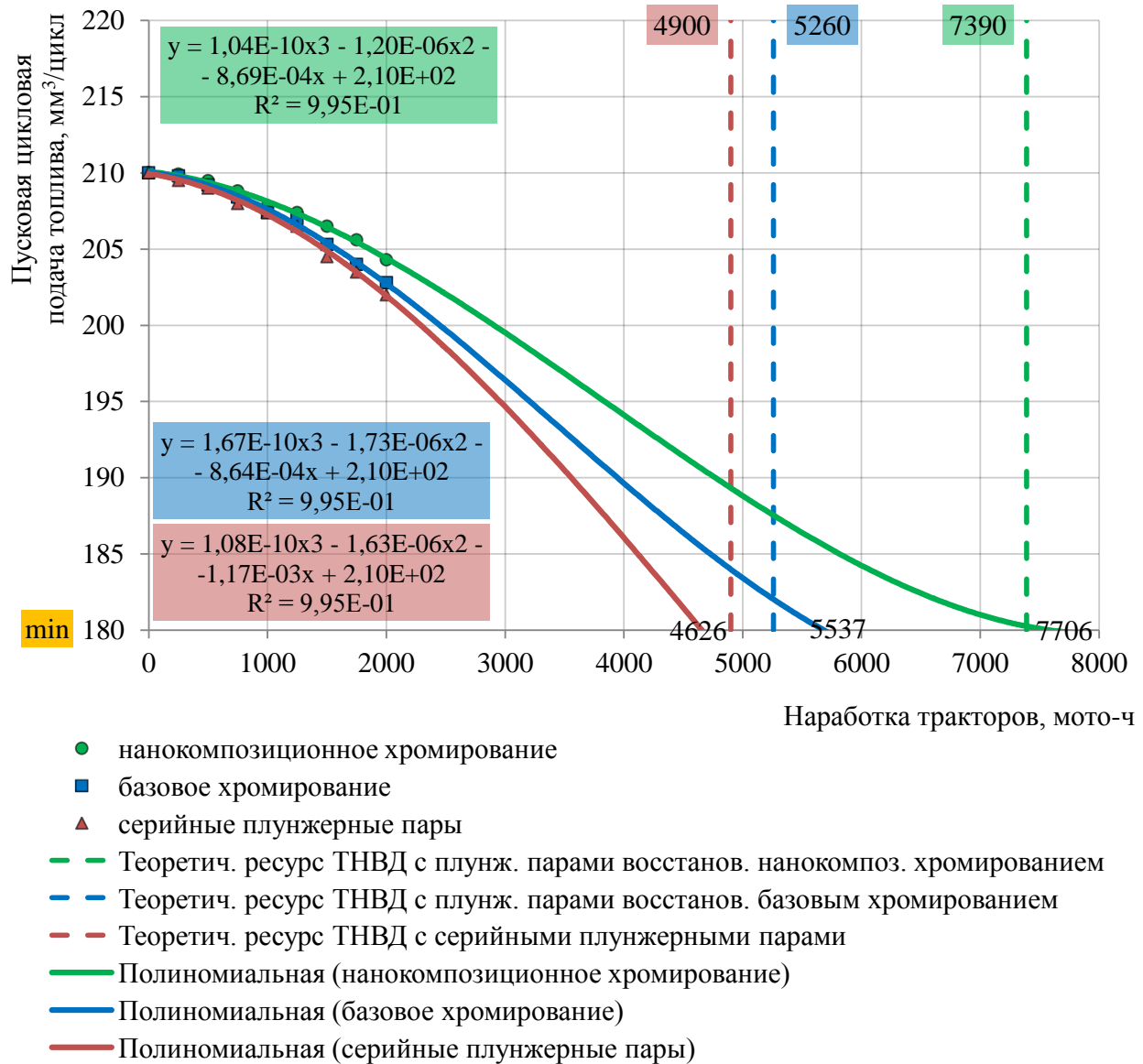


Рисунок 16 – Прогнозирование ресурса ТНВД дизеля ЯМЗ-238НДЗ

Из представленных данных видно, что прогнозируемый ресурс ТНВД дизеля ЯМЗ-238НДЗ с плунжерными парами, восстановленными с применением нанокмпозиционного хромирования, в среднем составляет 7706 мото-ч, что в 1,39 раза больше, чем у ТНВД с плунжерными парами, восстановленными с применением базового хромирования, и в 1,67 раза больше, чем у ТНВД с серийными плунжерными парами.

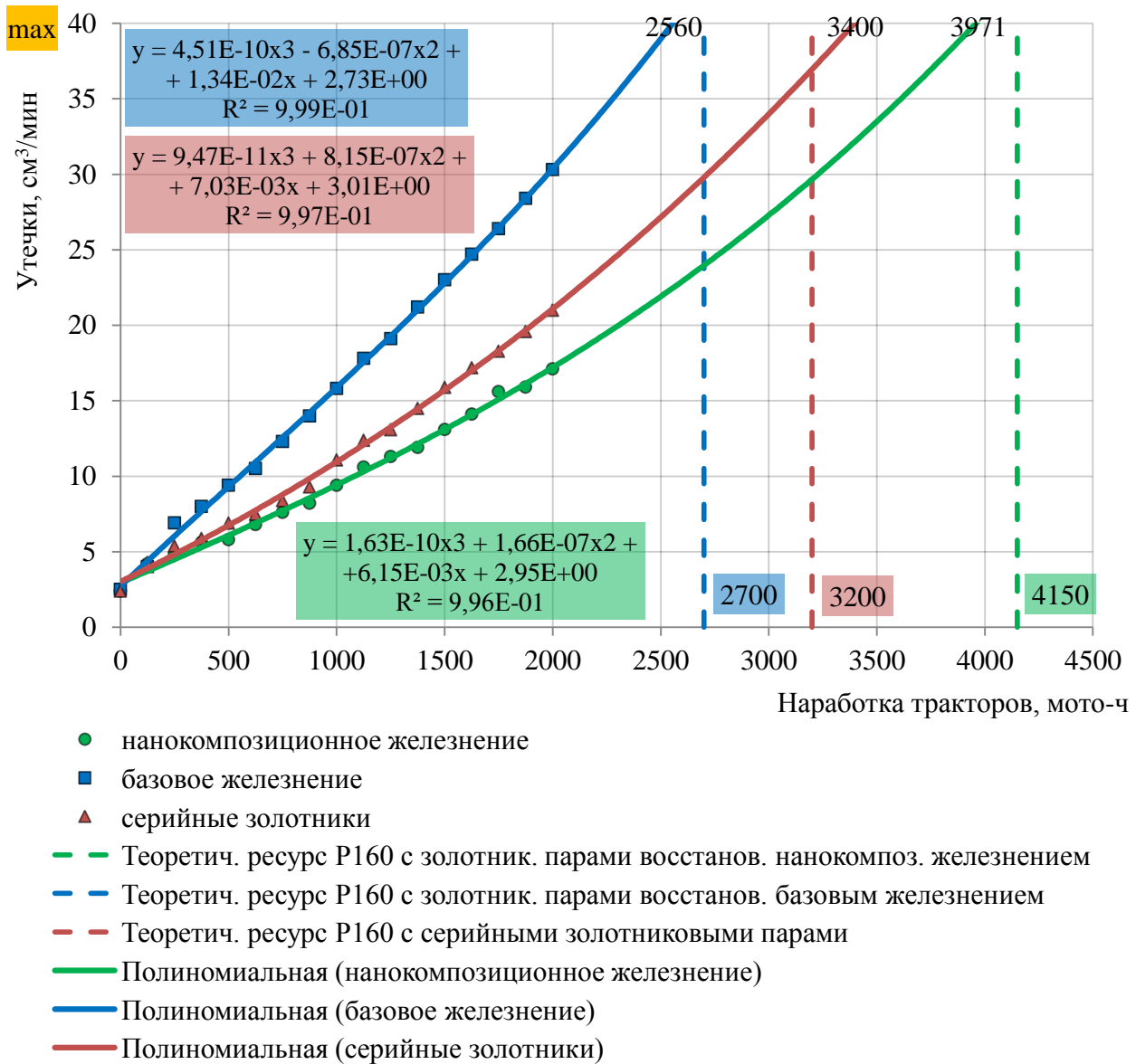


Рисунок 17 – Прогнозирование ресурса гидрораспределителей P160

У гидрораспределителей P160 с золотниковыми парами, восстановленными с применением нанокompозиционного электролитического железнения, прогнозируемый ресурс в среднем составляет 3971 мото-ч, что в 1,55 раза больше, чем у гидрораспределителей, золотниковые пары которых восстановлены с применением базового железнения, и в 1,17 раза больше, чем у серийных гидрораспределителей.

У гидрораспределителей P80, золотниковые пары которых восстановлены с применением нанокompозиционного химического никелирования, прогнозируемый ресурс в среднем составляет 4917 мото-ч, что в 1,7 раза больше, чем у гидрораспределителей, золотниковые пары которых восстановлены с применением базового химического никелирования, и в 1,42 раза больше, чем у серийных гидрораспределителей.

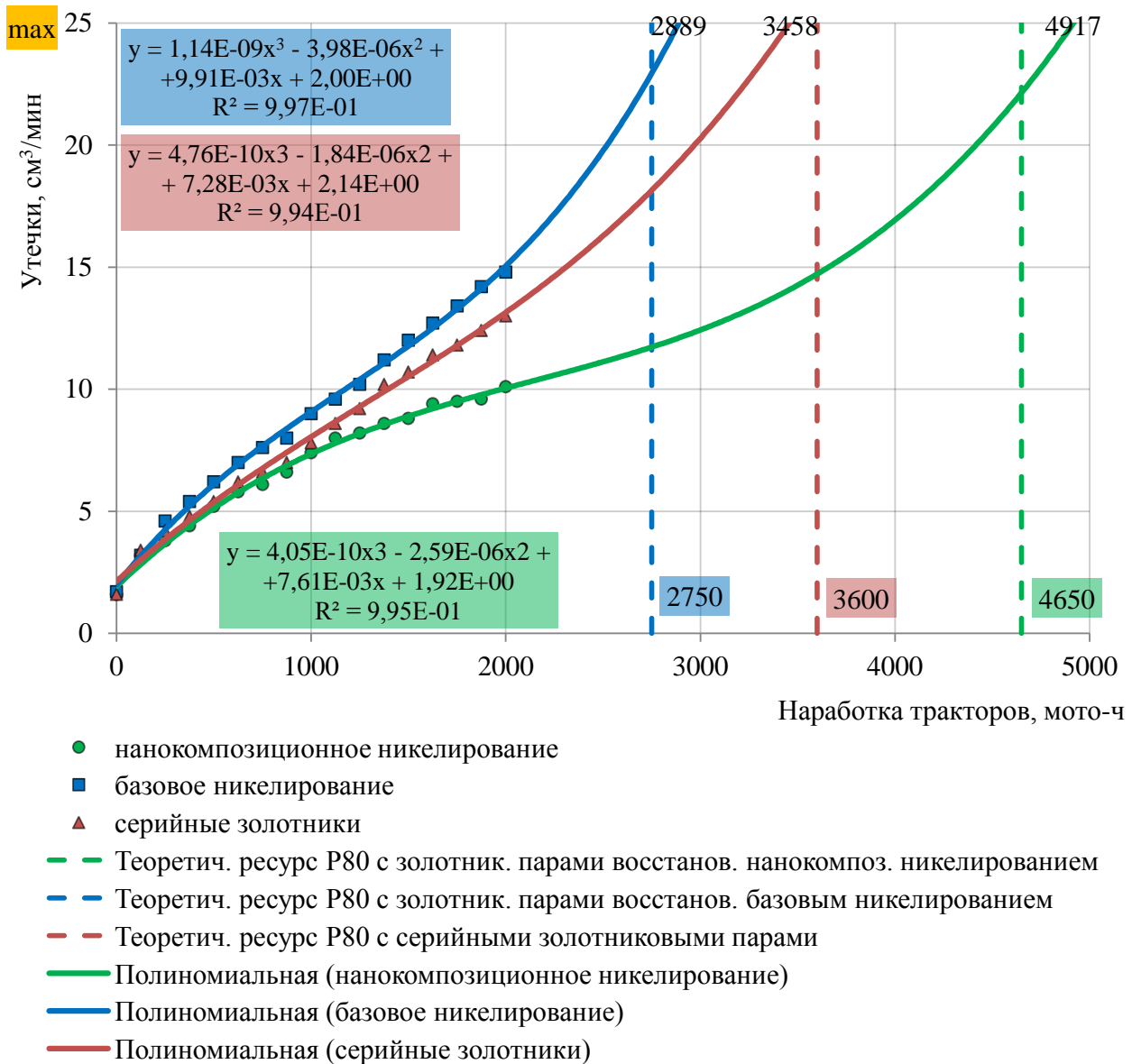


Рисунок 18 – Прогнозирование ресурса гидрораспределителей P80

Теоретически рассчитанные значения ресурса хорошо согласуются с прогнозируемыми (см. рисунки 16-18), расхождения не превышают 6 %, что позволяет сделать вывод о справедливости предложенной теоретической модели.

В пятой главе «Разработка технологий восстановления плунжерных и золотниковых пар и оценка их экономической эффективности» с учетом результатов теоретических и экспериментальных исследований были разработаны рекомендации по получению качественных нанокпозиционных гальвано-химических покрытий на основе хрома, железа и никеля, технологии восстановления плунжерных и золотниковых пар с применением таких покрытий и дана оценка экономической эффективности разработанных технологий.

Поступившие на восстановление плунжерные пары обезличивают и проводят дефектацию. Втулки плунжеров притирают на вертикально-доводочном станке 3820-Д до выведения следов износа, подвергают повторной химико-термической обработке до твердости 55–60 HRC и сортируют на размерные группы с интервалом 0,001 мм. Изношенные плунжеры в зависимости от величины износа либо притирают на плоскодоводочном станке 3816, либо шлифуют на бесцентрошлифовальном станке 3184 с последующей притиркой на плоскодоводочном станке 3816. После механической обработки на поверхности плунжеров наносят нанокпозиционное электролитическое покрытие на основе хрома из электролита следующего состава: CrO_3 – 225...275 г/л; K_2SiF_6 – 18...22 г/л; BaSO_4 – 5...7 г/л; H_2SO_4 – 0,34 г/л; наноразмерные частицы Al_2O_3 – 3,0...3,5 г/л. Режимы электролиза: плотность тока – 55...60 А/дм², температура электролита 50...55 °С. После этого плунжеры передают на контрольную операцию, где их сортируют на размерные группы с интервалом 0,002 мм. Далее плунжеры обрабатывают на плоскодоводочном станке 3816, сортируют на размерные группы с интервалом 0,001 мм и комплектуют с втулками. Совместную притирку плунжера и втулки осуществляют на доводочной бабке Т 9158-1А-9 с помощью доводочной пасты АСМ 2/1.

При восстановлении золотниковых пар гидрораспределителей Р160 их обезличивают и проводят дефектацию. Пояски в отверстиях корпуса хонингуют до выведения следов износа на вертикально-хонинговальном станке 3К833. Изношенные пояски золотников обрабатывают на бесцентрошлифовальном станке С250 до выведения следов износа. После шлифования на поверхности золотников наносят нанокпозиционное электролитическое покрытие на основе железа из электролита следующего состава: $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 200...300 г/л; HCl – 1,0...1,5 г/л; MnCl_2 – 5...7 г/л, наноразмерные частицы AlN – 3,0...3,5 г/л. Режимы электролиза: плотность катодного тока – 20...25 А/дм², температура электролита 65...70 °С. Далее золотники обрабатывают на бесцентрошлифовальном станке С250 и передают на комплектацию с корпусами посредством селективной сборки.

При восстановлении золотниковых пар гидрораспределителей Р80 их обезличивают и проводят дефектацию. Механическую обработку корпуса и золотника осуществляют аналогично механической обработке корпуса и золотника гидрораспределителя Р160. После шлифования на поверхности золотников наносят нанокпозиционное химическое покрытие на основе никеля из раствора следующего состава: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 20...30 г/л, $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ – 10...15 г/л, $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – 10...15 г/л, наноразмерные частицы Al_2O_3 – 3,0...3,5 г/л, наноразмерные частицы K_2O .

$n\text{TiO}_2$ – 4,0...4,5 г/л. Режимы: pH раствора 4,0...4,5, температура раствора 90...95 °С.

Описанные технологии восстановления плунжерных и золотниковых пар разработаны совместно с ООО «Сельхозтехника» и ООО «Саратовдизельаппарат» и переданы на предприятия вместе с комплектами технологической документации.

Изложенные технологии восстановления плунжерных и золотниковых пар внедрены на предприятиях ООО «Дизельремгруппа» (г. Санкт-Петербург), ООО Инновационный центр «ТрансЭнергоКомплект-С» (г. Саратов), ООО «Краснокутский электромеханический завод» (г. Красный Кут), ООО «Новые Транспортные Технологии» (г. Санкт-Петербург), ОАО «Ремонтный завод «Хоперский» (г. Балашов), ООО «Ремтехагро» (г. Саратов), ООО «Саратовдизельаппарат» (г. Саратов), ООО «Сельхозтехника» (г. Балашов).

Расчет экономической эффективности разработанных технологий, с учетом затрат на очистку сточных вод, показал, что при годовой производственной программе 6000 плунжерных пар технико-экономическая эффективность составит более 460 тыс. руб., а срок окупаемости капитальных вложений – 1,8 года. При годовой производственной программе 4500 золотниковых пар гидрораспределителей Р160 технико-экономическая эффективность составит более 560 тыс. руб., а срок окупаемости капитальных вложений – 1,1 года. При годовой производственной программе 9000 золотниковых пар гидрораспределителей Р80 технико-экономическая эффективность составит более 970 тыс. руб., а срок окупаемости капитальных вложений – 1,3 года. Проведенные расчеты свидетельствуют об экономической целесообразности применения разработанных технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Решая поставленную научную проблему повышения долговечности агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники путем восстановления их прецизионных деталей, в диссертационной работе разработаны и исследованы новые способы восстановления прецизионных деталей наноконпозиционными гальвано-химическими покрытиями на основе хрома, железа и никеля, позволяющие повысить ресурсы отремонтированных агрегатов до 1,7 раза по сравнению с новыми.

2. Анализ надежности сельскохозяйственной техники позволил установить, что она в большой степени определяется ресурсом агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры, на долю которых приходится до 42 и 26 % неисправностей и отказов соответственно. Ресурс агрегатов

топливной и гидравлической аппаратуры в свою очередь лимитируется ресурсом плунжерных и золотниковых пар. Существующие способы восстановления прецизионных деталей топливной и гидравлической аппаратуры имеют существенные недостатки. Наиболее перспективными являются наноконпозиционные гальвано-химические покрытия на основе хрома, железа и никеля.

3. На основании положений теории трения определено, что в ресурсопределяющих сопряжениях топливной и гидравлической аппаратуры преобладающими являются пластический контакт и микрорезание. Из анализа выражений для определения интенсивности изнашивания при пластическом контакте и микрорезании установлено, что важным фактором, оказывающим влияние на интенсивность износа, является твердость трущихся поверхностей. В результате физико-математического представления процесса образования и упрочнения наноконпозиционных покрытий получено выражение (10), позволяющее рассчитывать микротвердость получаемых покрытий. Полученные зависимости (4), (10), (11) дают возможность рассчитывать микротвердость наноконпозиционных гальвано-химических покрытий, интенсивности изнашивания деталей пар трения и ресурсы сопряжений, восстановленных такими покрытиями.

4. Разработана программа экспериментальных исследований, позволяющая с высокой степенью достоверности оценить влияние наноконпозиционных покрытий на ресурс агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры. Предложены оригинальные методики приготовления электролитов-суспензий (патенты РФ № 2283373, 2610381, 2465374) и лабораторная установка для нанесения наноконпозиционных покрытий (патент РФ № 2680116), обеспечивающие повышение седиментационной устойчивости электролитов-суспензий и получение стабильно качественных наноконпозиционных гальвано-химических покрытий.

Проведенные лабораторные исследования позволили определить наноразмерные материалы для получения покрытий с повышенными значениями микротвердости. Для наноконпозиционного электролитического покрытия на основе хрома – наноразмерный порошок оксида алюминия, для наноконпозиционного электролитического покрытия на основе железа – наноразмерный порошок нитрида алюминия, для наноконпозиционного покрытия на основе химического никеля – смесь наноразмерных порошков оксида алюминия и полититаната калия. В результате математического планирования экспериментов были определены режимы нанесения покрытий и концентрации наноразмерных порошков в электролитах и растворах.

Наибольшая микротвердость нанокпозиционного электролитического покрытия на основе хрома 14,32 ГПа достигалась при температуре электролита 50 °С, плотности тока 59 А/дм² и концентрации частиц наноразмерной фазы в электролите 3,2 г/л. Такая микротвердость в 1,48 раза превышает микротвердость базового покрытия хрома. Наибольшая микротвердость нанокпозиционного электролитического покрытия на основе железа 7,28 ГПа достигалась при температуре электролита 70 °С, плотности тока 21 А/дм² и концентрации частиц наноразмерной фазы в электролите 3,1 г/л, что в 1,24 раза превышает микротвердость базового покрытия железа. Наибольшая микротвердость нанокпозиционного покрытия на основе химического никеля достигалась при концентрации частиц оксида алюминия 3,2 г/л, концентрации частиц полититаната калия 4,1 г/л и температуре последующей термической обработки 350 °С. Получаемая при этом микротвердость 9,64 ГПа в 1,85 раза превышает микротвердость базового покрытия химического никеля.

5. Исследования морфологии и структуры покрытий позволили установить, что наноразмерные частицы, вводимые в электролиты и растворы, активизируют процесс получения покрытий и являются их центрами кристаллизации, что приводит к образованию более плотной измельченной структуры покрытий. Анализ спектрограмм, полученных в результате эмиссионного анализа образцов, показал, что нанокпозиционные покрытия содержат элементы наноразмерных частиц, применяемых для их получения, которые отсутствуют в базовых покрытиях. В результате проведенных лабораторных испытаний на износостойкость установлено, что нанокпозиционные электролитические покрытия на основе хрома обладают износостойкостью в 1,5–1,8 раза выше износостойкости базовых покрытий хрома и в 2,1–2,2 раза выше износостойкости стали ШХ15. Нанокпозиционные электролитические покрытия на основе железа характеризуются износостойкостью в 1,6–1,7 раза выше износостойкости базовых покрытий железа и в 1,3 раза выше износостойкости стали 15Х. У нанокпозиционных покрытий на основе химического никеля износостойкость в 1,7–1,8 раза выше износостойкости базовых покрытий хрома и в 1,6 раза выше износостойкости стали 15Х. На основании проведенных коррозионных испытаний было установлено, что коррозионная стойкость нанокпозиционного электролитического покрытия на основе хрома выше коррозионной стойкости базового покрытия хрома в 1,86 раза, коррозионная стойкость нанокпозиционного электролитического покрытия на основе железа выше коррозионной стойкости базового покрытия железа в 1,64 раза, а коррозионная стойкость

нанокomпозиционного покрытия на основе химического никеля выше коррозионной стойкости базового покрытия химического никеля в 1,26 раза.

6. По результатам стендовых испытаний снижение пусковой цикловой подачи топлива у ТНВД с плунжерными парами, восстановленными нанокomпозиционным электролитическим хромированием, в среднем в 1,4 раза меньше, чем у ТНВД с плунжерными парами, восстановленными базовым хромированием, и в 1,8 раза меньше, чем у ТНВД с серийными плунжерными парами. После проведения стендовых испытаний гидрораспределителей Р160 утечки в золотниковых парах, которые были восстановлены с применением нанокomпозиционного электролитического железнения, в среднем в 1,7 раза меньше, чем в золотниковых парах, которые были восстановлены с применением базового железнения, и в 1,3 раза меньше, чем в гидрораспределителях с серийными золотниковыми парами. В результате стендовых испытаний гидрораспределителей Р80 утечки в золотниковых парах, восстановленных с применением нанокomпозиционного химического никелирования, в среднем в 1,6 раза меньше, чем в золотниковых парах, которые были восстановлены с применением базового химического никелирования, и в 1,5 раза меньше, чем в гидрораспределителях с серийными золотниками.

По окончании проведения эксплуатационных испытаний ТНВД дизелей ЯМЗ-238НДЗ снижение пусковой цикловой подачи топлива у ТНВД с плунжерными парами, восстановленными с применением нанокomпозиционного электролитического хромирования, в среднем в 1,1 раза меньше, чем у ТНВД с плунжерными парами, восстановленными с применением базового хромирования, и в 1,4 раза меньше, чем у ТНВД с серийными плунжерными парами. После проведения эксплуатационных испытаний гидрораспределителей Р160 утечки в гидрораспределителях, золотниковые пары которых были восстановлены с применением нанокomпозиционного электролитического железнения, в среднем в 1,8 раза меньше, чем в гидрораспределителях, золотниковые пары которых были восстановлены с применением базового железнения, и в 1,2 раза меньше, чем в гидрораспределителях с серийными золотниковыми парами. Утечки в гидрораспределителях Р80, золотниковые пары которых были восстановлены с применением нанокomпозиционного химического никелирования, в среднем в 1,5 раза меньше, чем в гидрораспределителях, золотниковые пары которых были восстановлены с применением базового химического никелирования, и в 1,3 раза меньше, чем в гидрораспределителях с серийными золотниками. На основании результатов эксплуатационных испытаний спрогнозированы остаточные ресурсы агрегатов.

Прогнозируемый ресурс ТНВД дизелей ЯМЗ-238НДЗ с плунжерными парами, восстановленными с применением наноконпозиционного электролитического хромирования, в среднем составляет 7706 мото-ч. Это в 1,39 раза больше, чем у ТНВД с плунжерными парами, восстановленными с применением базового хромирования, и в 1,67 раза больше, чем у ТНВД с серийными плунжерными парами. У гидрораспределителей Р160 с золотниковыми парами, восстановленными с применением наноконпозиционного электролитического железнения, прогнозируемый ресурс в среднем составляет 3971 мото-ч, что в 1,55 раза больше, чем у гидрораспределителей, золотниковые пары которых восстановлены с применением базового железнения, и в 1,17 раза больше, чем у серийных гидрораспределителей. У гидрораспределителей Р80, золотниковые пары которых восстановлены с применением наноконпозиционного химического никелирования, прогнозируемый ресурс в среднем составляет 4917 мото-ч, что в 1,7 раза больше, чем у гидрораспределителей, золотниковые пары которых восстановлены с применением базового химического никелирования, и в 1,42 раза больше, чем у серийных гидрораспределителей. Теоретически рассчитанные значения ресурса хорошо согласуются с прогнозируемыми, расхождения не превышают 6 %, что позволяет сделать вывод о справедливости предложенной теоретической модели.

7. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны новые технологии восстановления плунжерных пар ТНВД дизелей ЯМЗ-238НДЗ наноконпозиционным электролитическим хромированием, золотниковых пар гидрораспределителей Р160 наноконпозиционным электролитическим железнением и золотниковых пар гидрораспределителей Р80 наноконпозиционным химическим никелированием. Разработанные технологии внедрены в производство на предприятиях технического сервиса, прошли производственную проверку и рекомендованы к внедрению на предприятиях, осуществляющих ремонт агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры.

В результате расчета экономической эффективности разработанных технологий установлено, что при годовой производственной программе 6000 плунжерных пар технико-экономическая эффективность составит более 460 тыс. руб., а срок окупаемости капитальных вложений 1,8 года. При годовой производственной программе 4500 золотниковых пар гидрораспределителей Р160 технико-экономическая эффективность составит более 560 тыс. руб., а срок окупаемости капитальных вложений 1,1 года. При годовой производственной программе 9000 золотниковых пар гидрораспределителей

Р80 технико-экономическая эффективность составит более 970 тыс руб., а срок окупаемости капитальных вложений 1,3 года.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Для предприятий технического сервиса рекомендуется модернизация существующих технологий ремонта агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры путем внедрения технологических процессов восстановления прецизионных деталей нанокпозиционными гальвано-химическими покрытиями на основе хрома, железа и никеля. Нанесение нанокпозиционных покрытий на основе хрома, железа и никеля следует проводить с помощью разработанных электролитов и растворов (патенты РФ № 2283373, 2610381, 2465374) и на установке (патент РФ № 2680116) под воздействием ультразвука частотой 18 кГц, позволяющей обеспечить седиментационную устойчивость электролитов-суспензий. Для получения нанокпозиционных гальвано-химических покрытий на основе хрома, железа и никеля рекомендуется использовать следующие наноразмерные порошки: на основе электролитического хрома – наноразмерный порошок оксида алюминия (3,0–3,5 г/л), на основе электролитического железа – наноразмерный порошок нитрида алюминия (3,0–3,5 г/л), на основе химического никеля – смесь наноразмерных порошков оксида алюминия (3,0–3,5 г/л) и полититаната калия (4,0–4,5 г/л).

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Особый интерес для дальнейшего развития темы представляют исследования в области создания многослойных нанокпозиционных гальвано-химических покрытий, применения антифрикционных наноразмерных материалов и разработки новых технологий восстановления ресурсопределяющих деталей сельскохозяйственной техники. Новые знания о физико-механических, фрикционных и триботехнических свойствах нанокпозиционных гальвано-химических покрытий позволят на этапе проектирования технологических процессов прогнозировать необходимые служебные свойства покрытий. Также одной из приоритетных задач в области восстановления деталей сельскохозяйственной техники нанокпозиционными гальвано-химическими покрытиями является создание для ремонтного производства новых высокотехнологичных установок для нанесения таких покрытий.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. **Шишурин, С. А.** Влияние добавки ультрадисперсного порошка оксида алюминия в электролит хромирования на микротвердость хромовых покрытий / С. А. Шишурин, В. В. Сафонов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2004. – № 4. – С. 50–52.

2. **Шишурин, С. А.** Нанокпозиционное гальваническое хромирование / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, А. В. Евстратов // Сельский механизатор. – 2005. – № 6. – С. 46–47.

3. **Шишурин, С. А.** Технология восстановления плунжерных пар топливных насосов высокого давления с применением композиционного гальванического хромирования / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, С. Н. Седов, К. В. Сафонов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2006. – № 6. – С. 64–67.

4. **Шишурин, С. А.** Способ упрочнения деталей машин нанокпозиционным хромированием / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2009. – № 1. – С. 51–53.

5. **Шишурин, С. А.** Применение наноматериалов при техническом сервисе автотракторной техники / В. В. Сафонов, В. А. Александров, С. А. Шишурин, А. С. Азаров // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». – 2009. – № 3 (34). – С. 62–66.

6. **Шишурин, С. А.** Наноматериалы повышают долговечность сельскохозяйственной техники / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, В. А. Александров // Техника и оборудование для села. – 2010. – № 5. – С. 40–42.

7. **Шишурин, С. А.** Нанокпозиционные никель-фосфорные покрытия с улучшенными эксплуатационными свойствами / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, Н. Б. Годунов, В. С. Семочкин // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2011. – № 12. – С. 56–58.

8. **Шишурин, С. А.** Теоретическое обоснование повышения ресурса деталей, упрочненных ультра- и нанокпозиционным химическим никелированием / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, В. С. Семочкин // Научное обозрение. – 2012. – № 1. – С. 21–26.

9. **Шишурин, С. А.** Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники с применением новых материалов / В. В.

Сафонов, Н. Б. Годунов, С. А. Шишурин, В. С. Семочкин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2012. – № 8. – С. 36–40.

10. **Шишурин, С. А.** Результаты стендовых испытаний гидрораспределителей с золотниками, восстановленными наноконпозиционным химическим никелированием // В. В. Сафонов, С. А. Богатырев, С. А. Шишурин, В. С. Семочкин // Научное обозрение. – 2013. – № 4. – С. 68–71.

11. **Шишурин, С. А.** Способ восстановления и упрочнения прецизионных деталей наноконпозиционным химическим покрытием / В. В. Сафонов, Э. К. Добринский, С. А. Шишурин, В. С. Семочкин // Научное обозрение. – 2013. – № 10. – С. 139–144.

12. **Шишурин, С. А.** Наномодифицированные химические покрытия с улучшенными физико-механическими свойствами / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, В. С. Семочкин // Инновации в АПК : проблемы и перспективы. – 2014. – № 3 (3). – С. 18–22.

13. **Шишурин, С. А.** Структура и физико-механические свойства композиционных гальванохимических покрытий / С. А. Шишурин, В. С. Семочкин, В. В. Сафонов, А. Е. Гурьев // Вестник АПК Ставрополя. – 2014. – № 3 (15). – С. 77–80.

14. **Шишурин, С. А.** Физико-математическая модель механизма упрочнения гальванических покрытий наноразмерными материалами / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, С. В. Чумакова, П. А. Горбушин // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 7. – С. 55–58.

15. **Шишурин, С. А.** Технология упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственной техники наноконпозиционным гальваническим железнением / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, С. В. Чумакова, П. А. Горбушин, Ш. М. Игитов // Научная жизнь. – 2019. – № 2. – С. 33–42.

16. **Шишурин, С. А.** Результаты стендовых испытаний гидрораспределителей, восстановленных с применением наноконпозиционного гальванического железнения / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, П. А. Горбушин, С. В. Парамонов, А. А. Хайкин // Научная жизнь. – 2019. – № 2 – С. 43–50.

17. **Шишурин, С. А.** Эксплуатационные свойства хромовых покрытий, полученных из саморегулирующегося электролита с добавлением наноразмерных частиц / С. А. Шишурин // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 7 – С. 95–100.

18. **Шишурин, С. А.** Результаты стендовых и эксплуатационных испытаний топливных насосов высокого давления с плунжерными парами,

восстановленными нанокomпозиционным хромированием / С. А. Шишурин // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 8 – С. 95–99.

В научных изданиях, включенных в базы Web of Science и Scopus

19. **Shishurin, S. A.** Effect of Alumina Nanoparticles on the Structure and Physicochemical Properties of Chromium Coatings / V. V. Safonov, S. A. Shishurin, V. S. Semochkin, A. M. Zakharevich // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2015. – Vol. 51. – No. 6. – P. 517–522.

20. **Shishurin, S. A.** Investigation of Structure and Wear Resistance of Nanocomposite Coating of Chemical Nickel / V. Safonov, S. Shishurin, P. Gorbushin, S. Chumakova, A. Kolomeichenko, Y. Kuznetsov, L. Kalashnikova // Tribology in Industry. – 2018. – Vol. 40. – No. 4. – P. 529–537.

21. **Shishurin, S. A.** Application of Composite Electroless Nickel Coatings on Precision Parts of Hydraulics Aggregates / V. Safonov, S. Shishurin, P. Gorbushin, A. Kolomeichenko, Y. Kuznetsov, L. Kalashnikova, A. Zakharevich // Tribology in Industry. – 2019. – Vol. 41. – No. 1. – P. 14–22.

22. **Shishurin, S. A.** The Influence of Nanosized Materials on Microhardness of Iron-Based Electroplating / V. V. Safonov, S. A. Shishurin, P. A. Gorbushin, S. V. Chumakova, V. V. Chekmarev // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. – 2019. – Vol. 8, – No. 6. – P. 629–632.

В монографиях и производственно-практических изданиях

23. **Шишурин, С. А.** Нанокomпозиционные гальванические покрытия : [монография] / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, В. А. Александров – Саратов : ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова», 2008. – 128 с.

24. **Шишурин, С. А.** Технологии нанесения нанокomпозиционных гальванических покрытий для деталей сельскохозяйственной техники : рекомендации по получению / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, П. А. Горбушин, Э. К. Добринский. – Саратов : ООО «Амирит», 2017. – 31 с.

25. **Шишурин С. А.** Технология нанесения нанокomпозиционного электролитического покрытия на основе железа для восстановления деталей сельскохозяйственной техники : рекомендации по получению / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, П. А. Горбушин. – Саратов : ООО «Амирит», 2019. – 27 с.

В авторских свидетельствах и патентах

26. Пат. 2283373 Российская Федерация, МПК С 25 D 15/00. Способ получения композиционных электрохимических покрытий из саморегулирующихся электролитов хромирования / В. В. Сафонов, Э. К. Добринский, С. И. Малашин, С. А. Шишурин, А. Р. Гольдберг, К. В.

Сафонов. – № 2004126058/02 ; заявл. 25.08.2004 ; опубл. 10.09.2006, Бюл. № 25.

27. Пат. **2465374 Российская Федерация, МПК С 23 С 18/36, В 82 В 1/00**. Раствор для химического осаждения композиционных никелевых покрытий / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, В. С. Семочкин. – № 2011111482/02 ; заявл. 25.03.2011 ; опубл. 27.10.2012, Бюл. № 30.

28. Пат. **2610381 Российская Федерация, МПК С 25 D 15/00**. Электролит-суспензия для получения износостойких покрытий на основе железа / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, П. А. Горбушин, С. В. Егоров. – № 2015126298 ; заявл. 13.07.2015 ; опубл. 09.02.2017, Бюл. № 4.

29. Пат. **2680116 Российская Федерация, МПК С 25 D 15/00, С 25 D 17/02**. Установка для получения композиционных электролитических покрытий / В. В. Сафонов, Э. К. Добринский, С. А. Шишурин, С. В. Чумакова, П. А. Горбушин. – № 2018116958 ; заявл. 07.05.2018 ; опубл. 15.02.2019, Бюл. № 5.

В журналах, сборниках научных трудов, материалах конференций и семинаров

30. **Шишурин, С. А.** Микротвердость композиционных хромовых покрытий, полученных при добавлении в электролит ультрадисперстных частиц / С. А. Шишурин // Народное хозяйство Западного Казахстана : состояние и перспективы развития : материалы науч.-практ. конф. – Уральск, 2004. – С. 84–87.

31. **Шишурин, С. А.** Влияние концентрации нанодисперсных порошков металлов в электролите на микротвердость и износоустойчивость хромового покрытия / С. А. Шишурин, В. В. Сафонов // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания : материалы межгос. науч.-техн. семинара. – Саратов, 2005. – С. 121–124.

32. **Шишурин, С. А.** Особенности нанесения композиционного гальванического покрытия на основе хрома / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин // Материалы Международной науч.-практ. конф., посвященной 70-летию со дня рождения профессора Александра Григорьевича Рыбалко. – Саратов, 2006. – С. 14–16.

33. **Шишурин, С. А.** Результаты стендовых и эксплуатационных испытаний плунжерных пар ТНВД, восстановленных с применением композиционного гальванического хромирования / С. А. Шишурин, В. В. Сафонов // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания : материалы межгос. науч.-техн. семинара. – Саратов, 2007. – С. 163–165.

34. *Шишурин, С. А.* Восстановление ответственных пар трения деталей машин нанокпозиционным гальваническим хромированием / С. А. Шишурин, В. В. Сафонов, А. В. Евстратов // Трибология и надежность : труды VII Международной науч. конф. – СПб, 2007. – С. 58–60.

35. *Шишурин, С. А.* Способ упрочнения деталей машин нанокпозиционным хромированием / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, А. В. Евстратов // Инновационные технологии механизации, автоматизации и технического обслуживания в АПК : материалы Международной науч.-практ. интернет-конф. – Орел, 2008. – С. 171–174.

36. *Шишурин, С. А.* Наноматериалы в ресурсосберегающих технологиях обеспечения работоспособности агрегатов сельскохозяйственной техники / С. А. Шишурин, А. В. Александров, В. В. Сафонов, А. С. Азаров, К. В. Сафонов // Вестник Челябинского агроинженерного университета. – 2008. – Т. 51. – С. 62–70.

37. *Шишурин, С. А.* Особенности структуры композиционного никель-фосфорного покрытия / С. А. Шишурин, В. В. Сафонов, В. С. Семочкин // Вавиловские чтения – 2009 : материалы Международной науч.-практ. конф. – Саратов, 2009. – С. 50–53.

38. *Шишурин, С. А.* Перспективы применения наноразмерных материалов для упрочнения гальванического покрытия железа / С. А. Шишурин, В. В. Сафонов, И. А. Чурбанов // Вавиловские чтения – 2009 : материалы Международной науч.-практ. конф. – Саратов, 2009. – С. 177–178.

39. *Шишурин, С. А.* Изменение физико-механических свойств гальвано-химических покрытий под воздействием наноразмерных порошков металлов / С. А. Шишурин, В. В. Сафонов, В. С. Семочкин // Вавиловские чтения – 2009 : материалы Международной науч.-практ. конф. – Саратов, 2009. – С. 176–177.

40. *Шишурин, С. А.* Способы восстановления и упрочнения деталей машин гальванохимическими покрытиями / С. А. Шишурин, В. В. Сафонов, В. С. Семочкин // Повышение эффективности функционирования механических и энергетических систем : материалы Всероссийской науч.-техн. конф. – Саранск, 2009. – С. 126–128.

41. *Шишурин, С. А.* Нанокпозиционное гальваническое хромирование / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, В. С. Семочкин // Главный механик. – 2010. – № 1. – С. 40–42.

42. *Шишурин, С. А.* Микротвердость нанокпозиционных гальванических покрытий на основе железа / С. А. Шишурин, И. А. Чурбанов // Специалисты АПК нового поколения : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. – Саратов, 2010. – С. 176–178.

43. *Шишурин, С. А.* Оценка прочности сцепления нанокomпозиционных никель-фосфорных покрытий с основой / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, В. С. Семочкин // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники: материалы Международного науч.-техн. семинара. – Саратов, – 2012. – С. 231-233.

44. *Шишурин, С. А.* Влияние нанодисперсных частиц на антифрикционные свойства композиционного покрытия хрома / С. А. Шишурин, В. В. Сафонов, Д. С. Наумов, У. Т. Бекчурин // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : материалы Международного науч.-техн. семинара. – Саратов, 2013. – С. 174–176.

45. *Шишурин, С. А.* Износостойкость композиционных самосмазывающихся хромовых покрытий / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, А. Е. Гурьев, Р. В. Ивлиев // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : материалы Международного науч.-техн. семинара. – Саратов, 2014. – С. 174–176.

46. *Шишурин, С. А.* Модификация химических покрытий никеля нанодисперсными материалами / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, В. С. Семочкин, А. А. Устинов // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники: материалы Международного науч.-техн. семинара. – Саратов, – 2014. – С. 178-179.

47. *Шишурин, С. А.* Теоретическое обоснование предельной концентрации нанодисперсных частиц в электролите / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, П. А. Горбушин, А. Е. Гурьев // Научная мысль. – 2015. – № 3. – С. 316–319.

48. *Шишурин, С. А.* Модификация гальванохимических покрытий на основе хрома, никеля и железа нанодисперсными частицами / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, П. А. Горбушин // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК : материалы XI Международной науч.-практ. конф. – Ставрополь, 2015. – С. 341–344.

49. *Шишурин, С. А.* Расчет износостойкости нанокomпозиционного гальванического покрытия / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, П. А. Горбушин, А. Е. Гурьев // Научная мысль. – 2016. – № 5. – С. 136–139.

50. *Шишурин, С. А.* Влияние нанодисперсных материалов на физико-механические свойства гальванических покрытий / С. А. Шишурин, А. Е. Гурьев, П. А. Горбушин, А. С. Савенков // Научно-технический прогресс в АПК : проблемы и перспективы : материалы Международной науч.-практ. конф. – Ставрополь, 2016. – С. 364–370.

51. *Шишурин, С. А.* Дислокационная модель упрочнения композиционных гальванических покрытий / С. А. Шишурин, П. А.

Горбушин, А. Б. Джумагалиев, Р. В. Вольсков, Д. А. Гребенкин // Научная мысль. – 2017. – № 3. – С. 149–151.

52. **Шишурин, С. А.** Способ восстановления и упрочнения деталей машин нанокмпозиционным железнением / П. А. Горбушин, С. А. Шишурин // Научная волна – 2017 : сборник статей Международной школы молодых ученых. – Саратов, 2017. – С. 51–53.

53. **Шишурин, С. А.** Теоретические предпосылки повышения твердости гальванического покрытия железа, модифицированного наноразмерными частицами / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, П. А. Горбушин, А. Е. Гурьев // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК : материалы XIII Международной науч.-практ. конф. – Ставрополь, 2017. – С. 356–360.