

На правах рукописи



Горбушин Павел Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ГИДРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ПУТЕМ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗОЛОТНИКОВ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫМ
ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ ЖЕЛЕЗНЕНИЕМ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Саратов 2019

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

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Шишурин Сергей Александрович

Официальные оппоненты: **Кисель Юрий Евгеньевич**, доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Брянский ГАУ», профессор кафедры электроэнергетики и автоматике
Величко Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарева», профессор кафедры технического сервиса машин

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет»

Защита состоится «__» _____ 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. В настоящее время более 70 % всех сельскохозяйственных работ выполняют тракторами и другими сельскохозяйственными машинами, оснащенными гидравлическими системами, посредством которых обеспечиваются подъем, опускание и привод рабочих органов прицепного, полуприцепного и навесного оборудования, а так же сельскохозяйственных орудий. Выход из строя гидравлической системы приводит к простоем техники, нарушению агрономических сроков обработки почвы или высева, что является причиной весомых экономических затрат. По данным министерства сельского хозяйства Саратовской области в 2018 году в области зарегистрировано порядка 23000 единиц сельскохозяйственной техники, из которых порядка 18000 единиц приходится на трактора. Эффективная работа сельскохозяйственных тракторов в значительной степени определяется техническим состоянием их гидравлической системы, на долю которой приходится до 24% основных неисправностей и отказов. При этом в самой гидравлической системе наименее надежным является гидрораспределитель, количество отказов которого достигает 32%. Наиболее интенсивно в процессе эксплуатации гидрораспределителей изнашиваются золотниковые пары. Высокая степень износов указанного сопряжения обусловлена знакопеременными нагрузками, высоким давлением гидравлической жидкости, наличием в ней абразивных частиц, конструктивными особенностями сопряжения, коррозионной активностью поверхностных слоев деталей и другими факторами. Высокая стоимость гидрораспределителей и частые их отказы из-за износа золотниковых пар определяют необходимость восстановления данного сопряжения.

Существующие технологии восстановления деталей золотниковых пар гидрораспределителей имеют существенные недостатки, их применение ограничено необходимостью использования сложного и дорогостоящего оборудования или они не обеспечивают требуемого ресурса сопряжения. Наиболее перспективными являются способы восстановления, обеспечивающие ресурс деталей на уровне новых, предусматривающие автоматизацию процессов, сводящие к минимуму последующую механическую обработку, протекающие при низких температурах. К таким способам в первую очередь относится электролитическое железнение.

Однако при всех достоинствах способ восстановления золотниковых пар с применением электролитического железнения имеет значительный недостаток, ограничивающий его применение – ресурс восстановленных данным способом деталей не достигает 80% от ресурса новых, что приводит к повышению себестоимости вследствие частых отказов сопряжения. Причиной недостаточного ресурса является невысокие микротвердость, износо- и коррозионная стойкость получаемых покрытий. Для устранения этих недостатков в последнее время стали успешно развивать технологию осаждения нанокomпозиционных электролитических покрытий. Метод основан на модификации существующих электролитических покрытий

частицами карбидов, оксидов, боридов, сульфидов, полимеров и т.д., имеющих размеры от 10^{-5} до 10^{-4} мм и позволяющих значительно изменять физико-механические свойства таких покрытий.

В связи с вышеизложенным предлагается усовершенствовать существующую технологию восстановления золотниковых пар гидрораспределителей модификацией электролитического железнения наноразмерными частицами и исследовать ее.

Актуальность работы подтверждается тем, что она выполнялась 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 программой: «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» (регистрационный номер 01201151795).

Степень разработанности темы. Исследованиями в области ремонта гидравлических систем сельскохозяйственных тракторов занимались и занимаются такие известные ученые, как В.И. Барышев, А.Н. Батищев, Н.И. Бахтияров, С.А. Величко, Е.В. Кипер, В.Е. Логинов, Н.И. Лихачев, А.А. Матвеев, Н.С. Мясоедов, Ю.Д. Пашин, В.З. Сергеев, Т.А. Сырицын, В.Е. Черкун и др. Всесторонними исследованиями электролитических покрытий, а так же исследованиями в области их модификации дисперсными материалами занимались и занимаются такие известные ученые, как Л.И. Антропов, А.Р. Асоян, 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, И.А. Спицын, Р.А. Усманов, В.И. Филатов, И.Г. Хабибуллин, В.И. Цыпцын, С.А. Шишури и многие др. Зарубежные авторы, работающие в этом направлении: К.Х. Гайгалас, М. Дзахо, Й. Коныс, Й. Лоренз, Ю.Ю. Матулис, Ц. Нолд, С.С. Рагигскене, Д.Я. Раманаускене, Т. Фудзии, Г. Шанз и др. Большинство работ ученых, в основном направлены на исследования электролитических покрытий, модифицированных частицами микрометрового диапазона, тогда как влияние частиц нанометрового диапазона на электролитическое покрытие остается малоизученным и требует рассмотрения.

Цель работы – увеличение межремонтного ресурса гидрораспределителей применением наноматериалов при восстановлении золотников электролитическим железнением.

Задачи исследования:

1. На основании литературных данных определить вид и степень изнашивания золотниковых пар гидрораспределителей сельскохозяйственных тракторов и способы восстановления их работоспособности.

2. Разработать математическую модель механизма упрочнения наноконпозиционных электролитических покрытий и теоретически обосновать повышение ресурса золотниковых пар гидрораспределителей при

восстановлении и упрочнении золотников нанокomпозиционным электролитическим покрытием на основе железа.

3. Определить режимы получения нанокomпозиционного электролитического покрытия на основе железа с высокими физико-механическими свойствами методом математического планирования эксперимента.

4. Провести лабораторные исследования физико-механических свойств нанокomпозиционного электролитического покрытия на основе железа и разработать технологический процесс восстановления золотниковых пар гидрораспределителей предлагаемым способом.

5. Провести сравнительные стендовые и эксплуатационные испытания гидрораспределителей и определить технико-экономическую эффективность предлагаемой технологии.

Объект исследования – золотник гидрораспределителя Р160, нанокomпозиционное электролитическое покрытие на основе железа.

Предмет исследования – процесс изменения свойств нанокomпозиционного электролитического покрытия под воздействием наноразмерных частиц.

Научную новизну работы представляют:

- методика теоретической оценки ресурса сопряжения, восстановленного с применением нанокomпозиционного электролитического покрытия, основанная на предлагаемой математической модели механизма упрочнения;

- установленные режимы электролиза и концентрация наноразмерных частиц в электролите для получения нанокomпозиционного электролитического покрытия с улучшенными физико-механическими свойствами.

- электролит-суспензия для получения износостойких покрытий на основе железа (пат. № 2610381), установка для получения композиционных электролитических покрытий (пат. № 2680116);

- результаты исследования морфологии и химического состава, физико-механических и эксплуатационных свойств нанокomпозиционного электролитического покрытия на основе железа.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в предложенных аналитических зависимостях определения микро-твердости нанокomпозиционного электролитического покрытия от вида и размера применяемого материала и его концентрации в электролите, определения ресурса сопряжения, восстановленного с применением нанокomпозиционного электролитического покрытия;

- в установлении режимов электролиза и концентрации наноразмерных частиц в электролите для получения нанокomпозиционных электролитических покрытий на основе железа с высокими физико-механическими свойствами, которые могут быть использованы при разработке ремонтно-обслуживающих мероприятий сельскохозяйственных тракторов, оснащенной гидрораспределителями золотникового типа;

- в практическом использовании на предприятиях технического сервиса предлагаемой технологии восстановления золотниковых пар гидрораспределителей типа P160 с применением нанокomпозиционного электролитического покрытия на основе железа, позволяющей увеличить ресурс золотниковых пар до 3971 мото-ч, что в 1,55 раза выше по сравнению с существующей;

- в применении результатов исследований в учебном процессе при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий по вопросам восстановления и упрочнения прецизионных деталей гидравлических распределителей.

Результаты работы внедрены на предприятиях: ООО «Сельхозтехника»; ООО «Саратовдизельаппарат», а также могут быть использованы в ремонтном производстве при восстановлении и упрочнении изношенных деталей автотракторной техники.

Методология и методы исследований. Методология исследований построена на основных принципах электролиза и гидравлики, условия адекватности исследовательских подходов и средств, позволяющих получить истинные знания об объекте, его физико-механических свойствах.

Основные методы исследований – эмпирические (наблюдение, сравнение, счет, измерение), экспериментально-теоретические, метод планирования экспериментов, статистические методы обработки данных, анализ, синтез и обобщение полученных результатов. Все исследования проводили согласно ГОСТам. При проведении исследований были использованы следующие приборы и установки: установка для получения композиционных электролитических покрытий; ультразвуковой генератор УЗГ-2М; ионометрический преобразователь И-500; микротвердомер ПМТ-3; исследовательский комплекс «Mira II Tescan», машина трения МИ-1М; модернизированный стенд КИ-4815М; набор диагностирования гидравлических систем КИ-28084М.

Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

- теоретическое обоснование способа повышения ресурса золотниковых пар, восстановленных с применением нанокomпозиционного электролитического покрытия на основе железа;

- результаты исследований влияния концентрации наноразмерных частиц и режимов нанесения нанокomпозиционного электролитического железнения на его микротвердость;

- результаты исследований влияния выбранного наноразмерного материала при установленной концентрации на основные физико-механические свойства нанокomпозиционного электролитического покрытия на основе железа;

- технология восстановления золотниковых пар гидрораспределителей P160 нанокomпозиционным электролитическим покрытием на основе железа;

- результаты сравнительных стендовых и эксплуатационных испытаний и оценка экономической эффективности предлагаемой технологии.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечена применением сертифицированных приборов и высокоточной измерительной аппаратуры, стандартных методик исследований, обработкой экспериментальных данных методами математической статистики, высокой сходимостью теоретических и экспериментальных данных.

Основные положения и результаты исследований были доложены, обсуждены и одобрены:

- на научно-практических конференциях ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова» (г. Саратов, 2013–2019 гг.);
- на Международном научно-техническом семинаре «Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники» (Саратов, 2013–2019 гг.);
- на 17-й – 20-й Российской агропромышленной выставке «Золотая осень» (Москва, 2015–2018 гг.);
- на конкурсе научно-инновационных работ молодых ученых и студентов ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова» (Саратов, 2015–2018 гг.);
- на VII, VIII индустриальном форуме «Саратов СОФИТ-ЭКСПО» (Саратов, 2015, 2016 гг.);
- на конкурсе У.М.Н.И.К. ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Саратов, 2016 г.);
- на форумах «САРАТОВ-АГРО. 2018», «САРАТОВ-АГРО. 2019» (Саратов, 2018, 2019 гг.).

По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе три в рецензируемых научных изданиях. Общий объем публикаций – 5,26 печ. л., из которых 2,14 печ. л. принадлежит лично соискателю. Получено два патента РФ на изобретения: № 2610381, № 2680116.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Изложена на 153 страницах, содержит 18 таблиц, 51 рисунок. Список литературы включает в себя 161 наименование, из них 13 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы, сформулированы степень разработанности, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Изложена методология и методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, цель и задачи исследования.

В первой главе «Состояние вопроса, цель и задачи исследования» на основании обзора литературных источников установлено, что гидравлическая система сельскохозяйственных тракторов является одной из основных систем, лимитирующих их эксплуатацию. При этом одной из причин выхода из строя гидравлической системы является низкий ресурс гидрораспределителя, который составляет не более 50% от ресурса, заявленного заводом-

изготовителем. Основным рабочим сопряжением гидрораспределителей являются золотниковые пары, износ которых в процессе эксплуатации приводит к увеличению утечек рабочей жидкости через диаметральный зазор между цилиндрическим отверстием в корпусе и поясками золотника.

По данным министерства сельского хозяйства Саратовской области в 2018 году в области было зарегистрировано порядка 4000 единиц сельскохозяйственных тракторов оснащённых гидрораспределителями типа P160. В связи с этим разработка технологии восстановления и упрочнения наиболее ответственных элементов данного гидрораспределителей является актуальной задачей.

Исследования причин отказов золотниковых пар позволили установить, что преобладающее негативное воздействие на рассматриваемое сопряжение оказывает гидроабразивное изнашивание, а наибольший суммарный износ достигает 0,2 мм.

Проведенный анализ литературных данных позволил определить основные способы восстановления золотниковых пар гидрораспределителей, наиболее перспективными из которых являются: для отверстий корпуса – алмазное хонингование, для золотников – нанесение на изношенные пояски нанокomпозиционного электролитического покрытия (НКЭП) на основе железа, которые представляют собой электролитически осажденную матрицу с заданным распределением в ней различных порошкообразных материалов. При нанесении НКЭП на основе железа отсутствует термическое воздействие на деталь, при этом достигается необходимая толщина восстанавливаемого слоя, а также появляется возможность изменять физико-механические свойства покрытий, такие, как микротвердость, износостойкость, антифрикционные характеристики, термическая и коррозионная стойкость. Кроме того, не требуются затраты на дорогостоящее оборудование, так как можно использовать существующее оборудование гальванических цехов, поскольку процесс практически не отличается от классического железнения.

Во второй главе «Теоретическое обоснование повышения ресурса золотниковых пар гидрораспределителей» рассмотрены теоретические зависимости влияния физико-механических свойств НКЭП на ресурс золотниковых пар гидрораспределителей.

Исследования, проведенные А.А. Старосельским и Д.Н. Гаркуновым, позволили установить зависимость остаточного ресурса сопряжения от скорости изнашивания по следующему равенству:

$$T_{з.п.} = \frac{I_n - I_n}{I_v}, \quad (1)$$

где $T_{з.п.}$ – остаточный ресурс золотниковой пары, ч; I_n – начальный износ золотниковой пары, мм; I_n – предельный износ золотниковой пары, мм; I_v – скорость изнашивания, мм/ч.

При определении остаточного ресурса нового или восстановленного сопряжения величиной I_n можно пренебречь.

Скорость изнашивания можно представить через ее интенсивность по следующей зависимости:

$$I_v = I_h v_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где $v_{\text{тр}}$ – скорость относительного перемещения поверхностей трения, мм/ч.

Анализ литературных данных показал, что основное негативное воздействие при гидроабразивном износе оказывает микрорезание поверхностей сопряжения абразивными частицами, для которого интенсивность изнашивания вычисляется следующим образом:

$$I_h = \frac{\text{tg } \beta}{2(v+1)} \frac{q_a}{HV}, \quad (3)$$

где β – угол внедрения абразивной частицы в материале, град; q_a – номинальное удельное давление, Па; $v+1$ – число циклов, приводящих к отделению частицы износа, шт.; HV – микротвердость детали, Па.

Интенсивность изнашивания золотниковой пары:

$$I_h^{\text{з.п.}} = I_h^{\text{з}} + I_h^{\text{к}}, \quad (4)$$

где $I_h^{\text{з}}$ и $I_h^{\text{к}}$ – интенсивность изнашивания золотника и корпуса соответственно.

Тогда с учетом выражений (2), (3) и (4) ресурс золотниковой пары:

$$T_{\text{з.п.}} = \frac{2(v+1)I_p(HV_{\text{з}} + HV_{\text{к}})}{\text{tg } \beta q_a v_{\text{тр}}}. \quad (5)$$

Анализируя полученное уравнение (5) можно сделать вывод о том, что при неизменных предельном износе золотниковой пары, числе циклов, приводящих к отделению частицы износа, угле внедрения абразивной частицы в поверхность детали, номинальном удельном давлении и скорости относительного перемещения поверхностей трения ресурс золотниковой пары будет зависеть от микротвердостей золотника и корпуса.

Многие исследователи в своих работах указывают, что основной теоретической базой для объяснения механизма упрочнения электролитических покрытий включением твердых наноразмерных частиц служит теория дислокаций и препятствий.

Упрочнение НКЭП является следствием точечных дефектов и несовершенств покрытий, что вызывает возникновение обратимых микропластических деформаций. Основными дефектами кристаллического строения могут являться точечные дефекты и дислокационные явления.

Так же известно, что наноразмерные частицы способствуют уменьшению размеров зерна покрытия, благодаря чему происходит уплотнение матрицы и как следствие – повышение микротвердости всей композиции.

Описанные выше процессы дают основание полагать, что механизм упрочнения НКЭП определяется следующими стадиями:

- изменение микротвердости электролитического покрытия при внедрении в него наноразмерных частиц, твердость которых в несколько раз превышает твердость самого покрытия;
- деформационное упрочнение от влияния дислокационных явлений и точечных дефектов;
- уменьшение размеров зерна НКЭП.

Это позволяет построить модель происходящих процессов с математической точки зрения (рисунок 1).

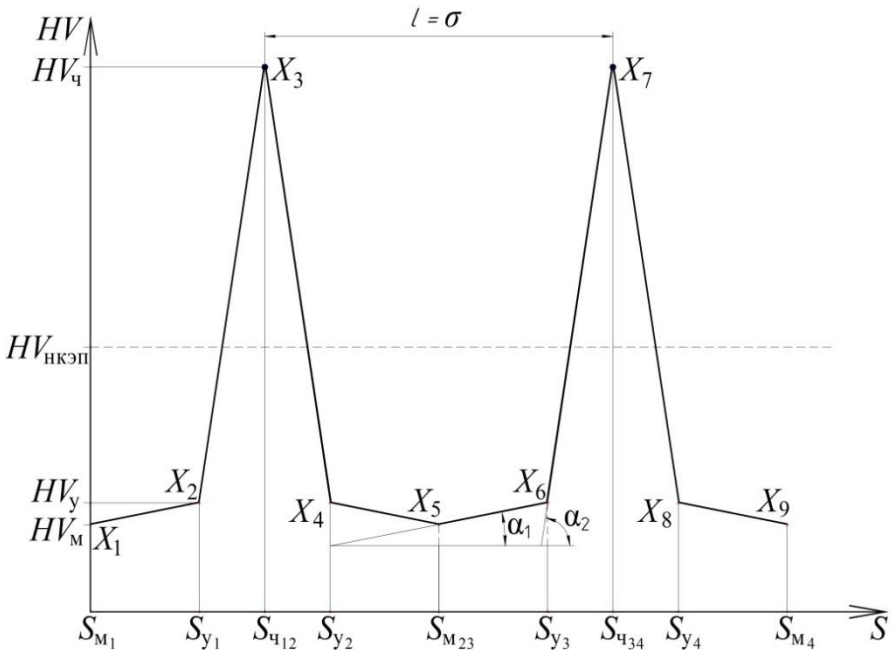


Рисунок 1 – Схема построения математической модели механизма упрочнения НКЭП: $HV_{ч}$ – микротвердость наноразмерных частиц; $HV_{нкэп}$ – теоретическая микротвердость нанокomпозиционного покрытия; $HV_{у}$ – микротвердость нанокomпозиционного покрытия, упрочненного в результате дислокационной микропластической деформации и уменьшения размеров его зерна; $HV_{м}$ – микротвердость электролитического покрытия без наноразмерных частиц; $S_{M_1} \dots S_{M_4}$, $S_{y_1} \dots S_{y_4}$, $S_{ч_{12}} \dots S_{ч_{34}}$ – координаты на оси S соответствующих величин $HV_{м}$, $HV_{у}$ и $HV_{ч}$; l – расстояние между наноразмерными частицами; α_1 , α_2 – углы наклона прямых; $X_1 \dots X_9$ – точки пересечения прямых; σ – период физико-математической модели

Графическое представление модели можно рассмотреть в виде схемы, определяемой плоскостью $HVS_{M_1}S$, где:

- 1) HV – ось, на которой отмечены значения микротвердости элементов покрытия;
- 2) S – ось, показывающая расстояние между элементами в покрытии.

Для нахождения теоретической микротвердости покрытия $HV_{нкэп}$ использованы элементы интегрального исчисления. В общем виде микротвердость НКЭП будет определяться как:

$$HV_{нкэп} = \frac{\int_{S_{M_1}}^{S_{M_{23}}} HV(S) dS}{l}. \quad (6)$$

Для упрощения задачи определения теоретической микротвердости НКЭП необходимо и достаточно найти ее значения по минимальной площади, тогда функцию (6) можно рассмотреть только в интервале $[S_{M_1}; S_{ч_{12}}]$ и представить в виде:

$$HV_{\text{НКЭП}} = \frac{2(\int_{S_{M1}}^{S_{y1}} (\text{tg } \alpha_1 S + b_1) dS + \int_{S_{y1}}^{S_{q12}} (\text{tg } \alpha_2 S + b_2) dS)}{l}, \quad (7)$$

где b_1, b_2 – коэффициенты смещения прямой по оси HV .

Расстояние между частицами в НКЭП можно найти по зависимости:

$$l = 3,74da_v^{-1/3}, \quad (8)$$

где d – диаметр частицы, м; a_v – содержание частиц в покрытии, %:

$$a_v = \frac{100C_3}{\rho_ч}, \quad (9)$$

где C_3 – концентрация частиц в электролите, г/л; $\rho_ч$ – плотность частиц, г/см³.

С учетом формул (8) и (9) зависимость микротвердости НКЭП от концентрации в нем наноразмерных частиц:

$$HV_{\text{НКЭП}} = \frac{2(\int_{S_{M1}}^{S_{y1}} (\text{tg } \alpha_1 S + b_1) dS + \int_{S_{y1}}^{S_{q12}} (\text{tg } \alpha_2 S + b_2) dS)}{3,74d \left(\frac{100C_3}{\rho_ч} \right)^{-1/3}}. \quad (10)$$

Подставив полученную зависимость (10) в формулу (5), с учетом того, что $HV_{\text{НКЭП}} = HV_3$, можно теоретически прогнозировать ресурс золотниковой пары, восстановленной с применением НКЭП на основе железа в зависимости от материала применяемого нанодисперсного порошка, его размера и концентрации в электролите.

Для определения наиболее эффективных режимов нанесения покрытия и концентрации наноразмерных частиц применяли метод математического планирования эксперимента. В качестве параметра оптимизации была принята микротвердость полученных покрытий. В качестве факторов, оказывающих наибольшее влияние на параметр оптимизации, были выбраны: концентрация наноразмерных частиц x_1 , температура электролита x_2 , плотность тока x_3 .

Третья глава «Программа и общая методика исследований» содержит программу и методики исследований физико-механических свойств нанокomпозиционных покрытий, а также проведения стендовых и эксплуатационных испытаний.

Для получения НКЭП была предложена следующая группа наноразмерных порошков в концентрациях 1, 3, 5 г/л: карбид вольфрама (WC), карбид кремния (SiC), карбид титана (TiC), нитрид алюминия (AlN) и оксид алюминия (Al₂O₃). Эффективность наноразмерного материала оценивали по величине микротвердости получаемого покрытия. Микротвердость электролитических покрытий определяли с помощью прибора ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды согласно ГОСТ 9450–76 по методу восстановленного отпечатка на металлографических шлифах.

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

Морфологию поверхности полученных покрытий исследовали с помощью растрового электронного микроскопа «MIRA II TESCAN». Определяли характер распределения наноразмерных частиц на поверхности покрытия,

принципиальные различия между покрытием без включения наноразмерных частиц и нанокпозиционным покрытием.

С целью определения химического элементного состава НКЭП на основе железа и обнаружения в нем присутствия наноразмерных частиц был проведен эмиссионный анализ образцов по дифракции отраженных электронов на исследовательском комплексе на базе «MIRA II TESCAN».

Сравнительные ускоренные трибологические испытания НКЭП на основе железа проводили в условиях трения скольжения на машине трения МИ-1М. Контактное взаимодействие образцов осуществляли по схеме «ролик – колодка». Испытания проводили согласно ГОСТ 23.224–86 в двух средах: на чистом и загрязненном индустриальном масле И-20 (ГОСТ 20799–88). В качестве загрязнителя использовали кварцевый порошок марки $1K_1O_101$ (ГОСТ 2138–91) при концентрации 0,08 % по массе смазочной среды. Нагрузка на образец составляла 850 Н. Время полного испытания – 9 ч (3 ч приработка, 6 ч – основное испытание). Износ образцов определяли взвешиванием на весах HR-250AZG 1-го класса точности (ГОСТ OIML R 76–1–2011).

Коррозионные испытания исследуемых покрытий проводили согласно ГОСТ 9.308–85 при переменном погружении в раствор. Перед испытанием образцы, подготовленные по ГОСТ 9.909–86, взвешивали на аналитических весах HR-250AZG, погружали в раствор на 10 мин, после чего их поднимали из раствора и оставляли на открытом воздухе в течение 50 мин. Продолжительность испытаний составляла 15 сут. Коррозионную стойкость образцов оценивали по потере массы после удаления продуктов коррозии в 10%-ом растворе гидроксида натрия (ГОСТ Р 55064–2012).

Для оценки разработанной технологии восстановления золотниковых пар гидрораспределителей Р160 НКЭП на основе железа и сравнения ее с существующей технологией применяли метод ускоренных стендовых испытаний. Золотники покрывали НКЭП в разработанной установке для нанесения композиционных электролитических покрытий (рисунок 2, а), на которую получен патент РФ № 2680116 из электролита-суспензии для получения износостойких покрытий на основе железа, на который получен патент РФ № 2610381. Перед началом испытаний гидрораспределители регулировали и проверяли в соответствии с ГОСТ 20245–74 на стенде КИ-4815М (рисунок 2, б).

Ускоренные испытания каждого распределителя проводили с применением искусственного загрязнителя рабочей жидкости $1K_1O_101$ ГОСТ 2138–91 при концентрации 0,08 % по массе рабочей жидкости. Эффективность разработанной технологии определяли путем сравнения величин утечек испытываемых гидрораспределителей.

Эксплуатационные сравнительные испытания проводили на тракторах К-700А, выполняющих различные нормированные сельскохозяйственные работы в ИП глава КФХ «Волков В.В.» и ООО «Агрофирма «Рубеж». Всего на эксплуатационных испытаниях в каждом хозяйстве находилось шесть тракторов. Перед началом испытаний гидрораспределители регулировали и проверяли в соответствии с ГОСТ 20245–74 на стенде КИ-4815М. В процессе



a



б

Рисунок 2 – Установка для нанесения композиционных электролитических покрытий (*a*) и стенд КИ-4815М для испытания гидрораспределителей (*б*)

эксплуатационных испытаний контролировали наработку тракторов и техническое состояние гидрораспределителей. Величину утечек в золотниковых парах гидрораспределителей проверяли через каждые 100–150 мото-ч.

В четвертой главе «Результаты исследований» приведены результаты лабораторных, стендовых и эксплуатационных испытаний, а также технология восстановления золотниковых пар гидрораспределителя Р160 3/1-222 НКЭП на основе железа.

По результатам измерения микротвердости был выбран наноразмерный порошок нитрида алюминия с концентрацией 3 г/л как наиболее эффективный, позволяющий повысить микротвердость покрытия до 682 HV, что в 1,5 раза выше, чем у покрытий без включения наноразмерных частиц. В связи с этим все последующие эксперименты проводили только с нанодисперсным порошком нитрида алюминия.

Расхождение теоретических значений микротвердости, полученных по зависимости (10), с экспериментальными значениями не превысило 15 %.

Проведенные расчеты при математическом планировании эксперимента позволили получить уравнения регрессии с кодированными (11) и физическими (12) переменными:

$$y_i^p = 713 + 40x_1 + 22x_2 - 78x_1^2 - 58x_2^2 - 47x_3^2; \quad (11)$$

$$y_i^{PH} = -3204,5 + 137x_1 + 81,2x_2 + 79,6x_3 - 19,5x_1^2 - 0,58x_2^2 - 1,88x_3^2. \quad (12)$$

По данным уравнения была построена поверхность отклика (рисунок 3), по которой определили, что максимальная микротвердость НКЭП в исследуемом факторном пространстве равна 717 ед. HV. Она достигается при концентрации нитрида алюминия 3,1 г/л, плотности тока 21 А/дм² и температуре электролита 70 °С.

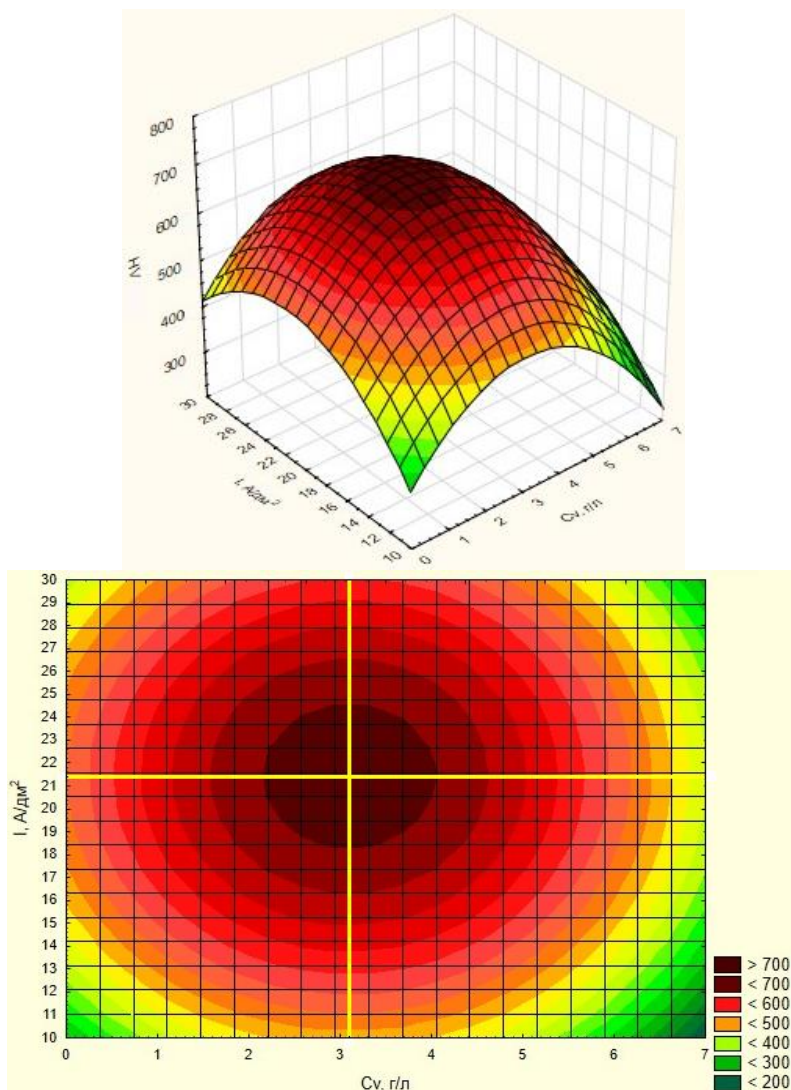


Рисунок 3 – Поверхность отклика НКЭП на основе железа

Осмотр образцов под микроскопом после испытаний на прочность сцепления показал, что отслаиваний, вздутий, трещин на покрытиях образцов не обнаружено.

При проведении исследования морфологии электролитических покрытий было выявлено, что классическое железнение не имеет на поверхности инородных включений, а нанокomпозиционное электролитическое покрытие на основе железа имеет на поверхности различные включения (рисунок 4).

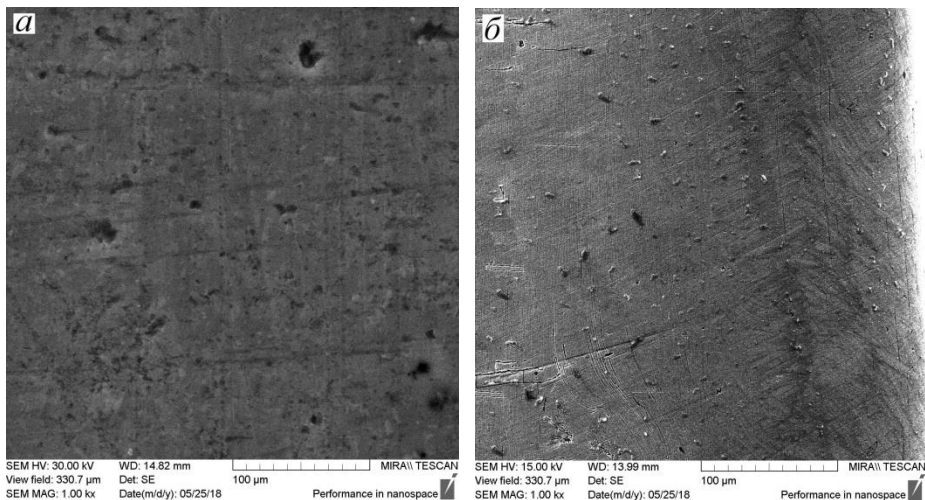


Рисунок 4 – Общий вид поверхностей электролитических покрытий на основе железа (увеличение $\times 1000$): *a* – классическое; *б* – нанокomпозиционное

В результате эмиссионного спектрального анализа были получены спектрограммы классического и нанокomпозиционного покрытий (рисунок 5), по которым было рассчитано процентное содержание элементов по массе (см. таблицу).

**Содержание основных химических элементов в покрытиях
В массовых процентах**

Элемент	Содержание элемента в покрытии	
	классическом	нанокomпозиционном
Fe	86,18	80,55
C	5,55	7,52
O	8,15	9,45
Cl	0,12	0,27
Al	–	1,26
N	–	0,95

Примечание: содержание элементов, не приведенных в таблице, – не более 0,05 % по массе

Как видно из представленных данных, в НКЭП, помимо железа, углерода и хлора содержатся алюминий (1,26 % по массе) и азот (0,95 % по массе), что подтверждает предположение о внедрение наноразмерных частиц нитрида алюминия в покрытие.

Результаты сравнительных трибологических испытаний показали, что минимальный суммарный износ по массе наблюдается у пары трения, на ролики которой нанесено НКЭП на основе железа, как при испытаниях в чистой смазочной среде, так и при испытаниях в загрязненной смазочной

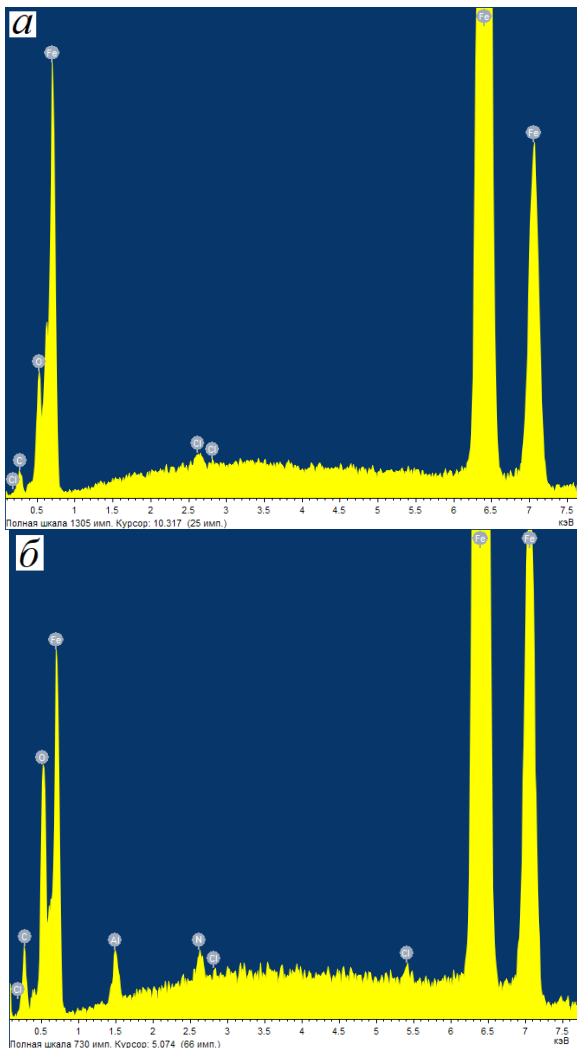


Рисунок 5 – Спектрограммы электролитического покрытия на основе железа:
a – классическое; *b* – нанокomпозиционное

среде (рисунок *b*). В чистой смазочной среде суммарный износ по массе пары трения, на ролики которой нанесено исследуемое покрытие, составил 0,0436 г, что в 1,7 раз меньше, чем у пары трения, на ролики которой нанесено классическое покрытие железа, и в 1,3 раза меньше, чем у пары трения из стали 15X без покрытия. В загрязненной смазочной среде суммарный износ по массе пары трения, на ролики которой нанесено НКЭП на основе железа, составил 0,0621 г, что в 1,6 раза меньше, чем у пары трения, на ролики которой нанесено классическое покрытие железа, и в 1,35 раза меньше, чем у пары трения из стали 15X без покрытия.

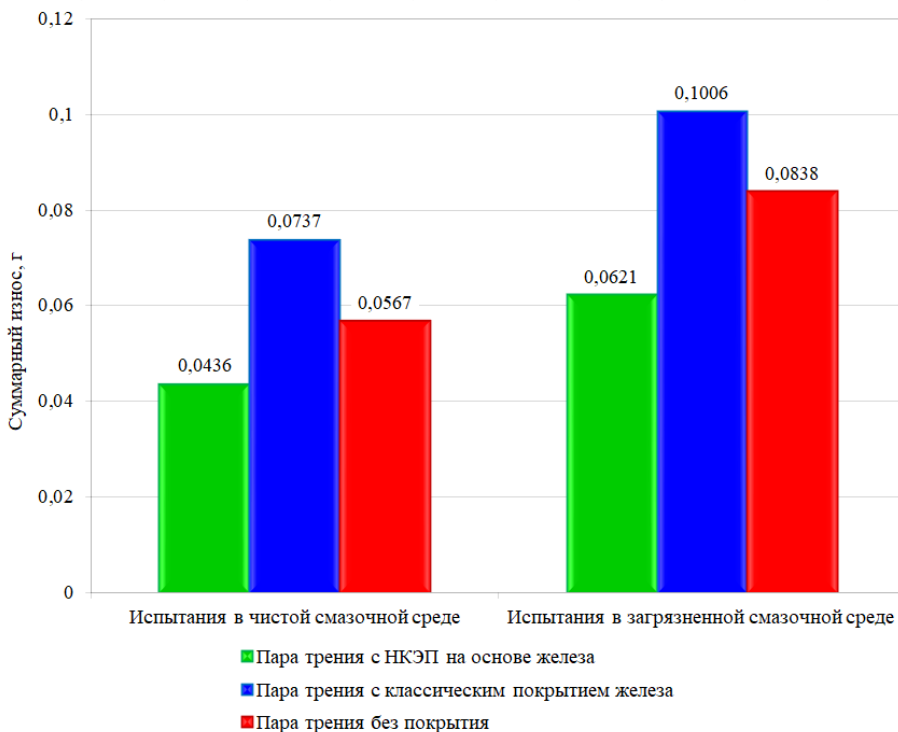


Рисунок 6 – Суммарный износ по массе пар трения после ускоренных сравнительных трибологических испытаний

В результате испытаний на коррозионную стойкость было установлено, что уменьшение массы образцов с НКЭП составило 0,53 г, что в 1,64 раза меньше, чем у образцов с классическим покрытием, однако в 1,1 раза больше, чем у образцов без покрытия.

На основании проведенных исследований НКЭП на основе железа разработан технологический процесс восстановления золотниковых пар гидрораспределителя Р160 с применением указанного покрытия, рассчитаны режимы обработки, подобраны технологическое оборудование, приспособления и инструменты.

После проведения стендовых испытаний было установлено, что величина утечек (рисунок 7) у гидрораспределителей, золотниковые пары которых восстанавливали с применением НКЭП на основе железа, составила 19,6 см³/мин, что в 1,74 раза меньше, чем у гидрораспределителей, золотниковые пары которых были восстановлены по существующей технологии, и в 1,25 раза меньше, чем у серийных гидрораспределителей.

Эксплуатационные испытания, проведенные в ИП глава КФХ «Волков В.В.» и ООО «Агрофирма «Рубеж» показали, что средняя наработка тракторов составила около 1400 и 2000 мото-ч соответственно.

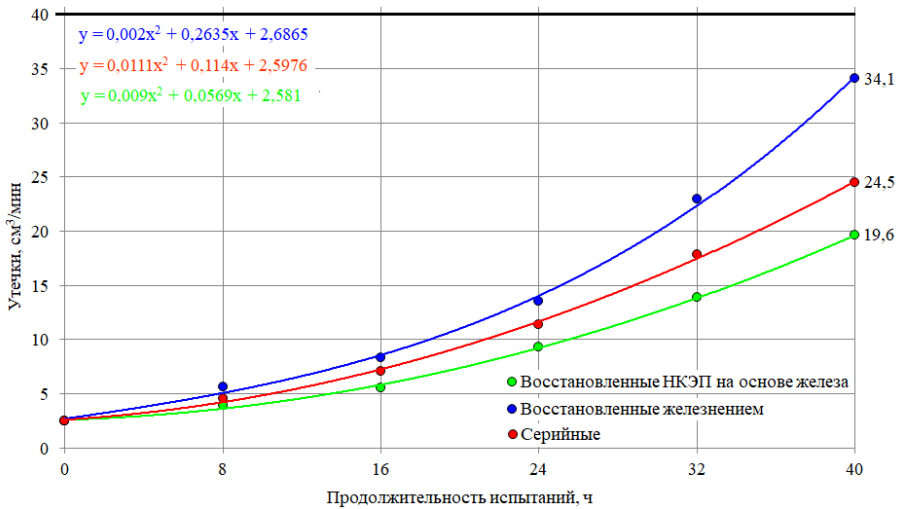


Рисунок 7 – Результаты стендовых испытаний гидрораспределителей

Величины утечек (рисунок 8) у гидрораспределителей, золотниковые пары которых были восстановлены и упрочнены с применением НКЭП на основе железа, составили 11,7 и 17,1 см³/мин в ИП Глава КФХ «Волков В.В.» и ООО «Агрофирма «Рубеж» соответственно, что в 1,75 – 1,8 раза меньше, чем в гидрораспределителях, золотниковые пары которых восстановлены по существующей технологии, и в 1,2 – 1,25 раза меньше, чем у серийных гидрораспределителей.

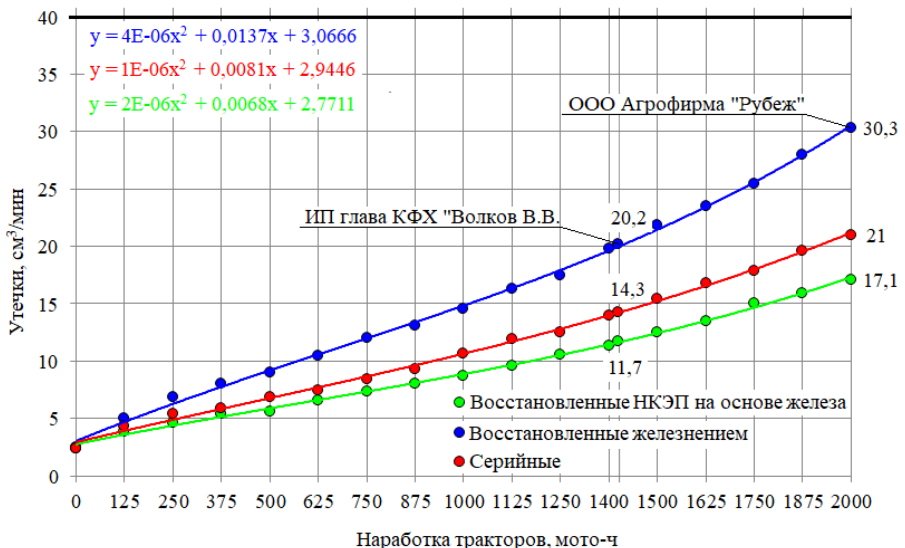


Рисунок 8 – Результаты эксплуатационных испытаний гидрораспределителей

По полученным данным прогнозировали остаточный ресурс гидрораспределителей. При прогнозировании остаточного ресурса гидрораспределителей использовали метод наименьших квадратов. Расчет вели по квадратичной модели. Из представленных данных видно (рисунок 9), что прогнозируемый ресурс гидрораспределителей Р160 с золотниковыми парами, восстановленными по предлагаемой технологии с применением НКЭП на основе железа, составил 3971 мото-ч, что в 1,55 раза больше, чем у гидрораспределителей, золотниковые пары которых восстановлены по существующей технологии электролитическим железнением, и в 1,17 раза больше, чем у серийных гидрораспределителей.

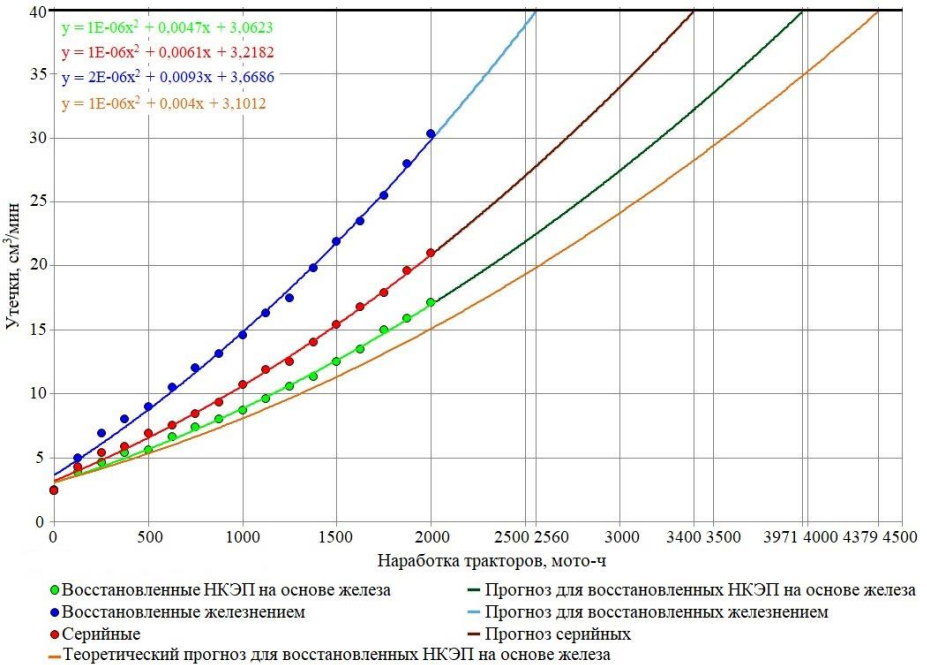


Рисунок 9 – Сравнение остаточных прогнозируемых и теоретического ресурсов гидрораспределителей Р160

Теоретическое значение ресурса по зависимости (5) с учетом формулы (10) для гидрораспределителей с золотниковыми парами, восстановленными по предлагаемой технологии, составило 4379 мото-ч, расхождение с экспериментальными значениями – 10,3 %.

В пятой главе «Технико-экономическая эффективность разработанной технологии» дана оценка технико-экономической эффективности разработанной технологии восстановления золотниковых пар. Годовой экономический эффект при годовой производственной программе 1200 золотников составил более 600 тыс. руб. Срок окупаемости капитальных

вложений 0,25 года. Проведенные расчеты свидетельствуют об экономической целесообразности применения разработанной технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена одна из важных задач ремонтного производства – увеличение межремонтного ресурса гидрораспределителей применением наноматериалов при восстановлении золотников электролитическим железением.

1. Анализ литературных данных показал, что на гидравлическую систему сельскохозяйственных тракторов приходится до 24 % отказов от их общего числа. Одна из основных причин низкой надежности гидравлической системы – недостаточный ресурс гидрораспределителей (до 32 % отказов). Наиболее интенсивно в процессе эксплуатации изнашиваются золотниковые пары, ухудшение технического состояния которых приводит к нарушению нормальной работы всей гидросистемы и повышению себестоимости производимых работ. Причины нарушения геометрической формы деталей золотниковых пар определяются в основном гидроабразивным износом при содержании механических примесей в гидравлической жидкости. При анализе износного состояния было выявлено, что наибольший суммарный износ, возникающий в золотниковой паре гидрораспределителя, не превышает 0,2 мм. Существующие способы восстановления рассматриваемого сопряжения имеют существенные недостатки – они трудоемки и не обеспечивают требуемого ресурса. Проведенный анализ технологий восстановления деталей золотниковой пары показал, что для корпуса гидрораспределителя наиболее перспективным является способ восстановления изношенных поясков алмазным хонингованием, а для золотника – нанесение нанокomпозиционного электролитического покрытия на основе железа. Применение указанного покрытия дает возможность исключить большинство недостатков существующих способов восстановления.

2. Установлено, что на ресурс гидрораспределителей превалирующее воздействие оказывает износостойкость золотниковой пары, которая в большей степени определяется суммарной микротвердостью сопрягаемых деталей. На основании теории физики и механики твердого тела предложена математическая модель механизма упрочнения нанокomпозиционного электролитического покрытия на основе железа. С помощью математического анализа данной модели установлена теоретическая зависимость (5), позволяющая прогнозировать ресурс гидрораспределителя при восстановлении его с применением нанокomпозиционного электролитического покрытия на основе железа.

3. Методом математического планирования эксперимента установлены режимы и концентрация наноразмерного порошка нитрида алюминия для нанесения нанокomпозиционного электролитического покрытия на основе железа, позволяющие получать покрытия с микротвердостью до 717 ед. HV, что в 1,6 раз выше, чем у покрытия без включения наноразмерных частиц. На установку для получения композиционных электролитических покрытий и

электролит-суспензию для получения износостойких покрытий на основе железа получены патенты РФ соответственно № 2680116, № 2610381.

4. Методом растровой электронной микроскопии определена морфология наноконпозиционного электролитического покрытия на основе железа и установлено, что наноразмерные частицы нитрида алюминия внедряются в него в процессе электролиза. С помощью масс-спектрального анализа образцов выявлено, что наноконпозиционное электролитическое покрытие на основе железа содержит алюминий (1,26 % по массе) и азот (0,95 % по массе), тогда как в классическом покрытии такие элементы отсутствуют.

Сравнительные трибологические испытания образцов пар трения показали, что суммарный износ по массе пары трения с наноконпозиционным электролитическим покрытием в 1,6–1,7 раза меньше, чем у пары трения с классическим электролитическим покрытием, и в 1,3–1,4 раза меньше, чем у пары трения без покрытия.

При испытаниях на коррозионную стойкость установлено, что НКЭП на основе железа имеет коррозионную стойкость в 1,6 раза выше, чем классическое электролитическое покрытие.

На основании результатов теоретических исследований и лабораторных испытаний разработан технологический процесс восстановления золотниковых пар гидрораспределителей Р160 с применением наноконпозиционного электролитического покрытия на основе железа.

5. Стеновыми испытаниями было установлено, что величина утечек у гидрораспределителей, золотниковые пары которых восстанавливали по разработанной технологии, в 1,7 раза меньше, чем у гидрораспределителей, золотниковые пары которых были восстановлены по существующей технологии, и в 1,25 раза меньше по сравнению с серийными.

Эксплуатационные испытания показали, что величина утечек у гидрораспределителей, золотниковые пары которых были восстановлены наноконпозиционным электролитическим покрытием, в 1,75 раза меньше, чем у гидрораспределителей, золотниковые пары которых восстановлены по существующей технологии, и в 1,2 раза меньше, чем у серийных.

На основании результатов эксплуатационных испытаний путем прогнозирования остаточных ресурсов агрегатов было установлено, что ресурс гидрораспределителей с золотниковыми парами, восстановленными по предлагаемой технологии, в 1,55 раза больше, чем у гидрораспределителей, золотниковые пары которых восстановлены по существующей технологии, и в 1,2 раза больше, чем у серийных гидрораспределителей.

Годовая технико-экономическая эффективность от внедрения предлагаемой технологии при годовой производственной программе 1200 гидрораспределителей составила более 600 тыс. руб.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Предложенные технология, электролит-суспензия, установка для получения композиционных электролитических покрытий рекомендуются для

восстановления золотниковых пар гидрораспределителей, величина износа которых превышает 0,1 мм, на предприятиях технического сервиса и в ремонтных мастерских, предусматривающих наличие гальванического цеха.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Направлениями дальнейшего исследования по данной тематике могут быть:

- исследования влияния термообработки на электролитические покрытия железнения, модифицированные наноразмерными частицами нитрида алюминия;
- расширение номенклатуры исследуемых твердых наноразмерных порошков и возможная их комбинация для получения оптимальных физико-механических свойств нанокomпозиционных покрытий;
- модификация электролитического покрытия на основе железа фрикционными наноразмерными частицами для придания уникальных свойств при восстановлении корпусных деталей;
- исследования влияния совместного осаждения твердых и фрикционных наноразмерных частиц на физико-механические свойства получаемых покрытий.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

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

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

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

В авторских свидетельствах и патентах

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

5. Пат. 2680116 Российская Федерация, ИПК 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

6. **Горбушин, П. 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 : матер. Междунар. науч.-практ. конф. в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал – 2016». – Ставрополь, 2016. – С. 364–370.

7. **Горбушин, П. 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.

8. **Горбушин, П. А.** Микротвердость композиционных гальванических покрытий на основе железа / В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, В. С. Семочкин, П. А. Горбушин // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : матер. Междунар. науч.-техн. семинара им. В. В. Михайлова. – Саратов, 2014. – С. 176–179.

9. **Горбушин, П. 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 : матер. XI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию факультета механизации сельского хозяйства, в рамках XVII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал – 2015». – Ставрополь, 2015. – С. 341–344.

10. **Горбушин, П. А.** Повышение ресурса деталей сельскохозяйственной техники модифицированием гальванических покрытий нанодисперсными материалами / А. С. Савенков, В. В. Сафонов, С. А. Шишурин, П. А. Горбушин // Научная мысль. – 2016. – № 5. – С. 132–135.

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

12. **Горбушин, П. А.** Способ восстановления и упрочнения деталей машин наноконпозиционным железнением / П. А. Горбушин С. А. Шишурин, // Научная волна – 2017 : сб. статей Международной школы молодых ученых / ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова». – Саратов, 2017. – С. 51–53.

13. **Горбушин, П. 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.

14. **Горбушин, П. 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: сб. науч. статей по материалам XIII Междунар. науч.-практ. конф., в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки "Агроуниверсал – 2017". Ставрополь, 2017. – С. 356–360.

15. **Gorbushin, P. A.** Increase in the Detail Resource of Agricultural Machinery by Modifying of Electroplated Coating Nanodispersed Materials / V. V. Safonov, S. A. Shishurin, P. A. Gorbushin, A. S. Savenkov // Аграрная наука в XXI веке : проблемы и перспективы : сб. статей Всерос. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова».– Саратов, 2018. – С. 724–727.