

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Саратовский государственный аграрный
университет имени Н.И. Вавилова»**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

к.т.н., доцент

Шишурин С.А.

Саратов – 2019 г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	6
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	13
1.1 Выбор объекта исследования	13
1.2 Материал, термообработка и технические требования, предъявляемые к золотниковым парам Р160	18
1.3 Характер, величина износа и механизм изнашивания золотниковой пары гидрораспределителя Р160.....	24
1.4 Анализ способов восстановления работоспособности золотниковых пар гидрораспределителей Р160.....	28
1.4.1 Восстановление корпуса	28
1.4.2 Восстановление золотника.....	31
1.5 Железнение, модифицированное дисперсными частицами, как способ восстановления золотниковых пар	35
1.6 Выводы по разделу	42
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ЗОЛОТНИКОВЫХ ПАР ГИДРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ	43
2.1 Механизм образования композиционных электролитических покрытий	43
2.2 Теоретическое обоснование повышения ресурса золотниковой пары гидрораспределителя.....	50
2.3 Математическая модель повышения микротвердости наноконпозиционных электролитических покрытий	52
2.4 Применение метода математического планирования эксперимента для определения наиболее эффективных режимов нанесения покрытия и концентрации наноразмерных частиц	58
2.5 Выводы по разделу	63
3 ПРОГРАММА И ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	65

3.1 Программа исследований.....	65
3.2 Методика получения нанокompозиционных покрытий на основе железа	66
3.3 Методика исследования влияния наноразмерных твердых частиц на микротвердость электролитического покрытия железа	73
3.4 Методика определения прочности сцепления покрытия с основным металлом	78
3.5 Методика исследования морфологии поверхности и химического состава покрытий.....	79
3.5.1 Методика исследования морфологии поверхности покрытий	79
3.6 Методика ускоренных сравнительных трибологических испытаний.....	81
3.7 Методика коррозионных испытаний	85
3.8 Методика стендовых испытаний.....	86
3.9 Методика эксплуатационных испытаний	92
3.10 Обработка экспериментальных данных и оценка точности измерений	94
3.11 Выводы по разделу	96
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	97
4.1 Результаты исследования влияния наноразмерных твердых частиц на микротвердость электролитического покрытия железа	97
4.2 Результаты определения наиболее эффективных режимов нанесения покрытия и концентрации наноразмерных частиц	100
4.3 Результаты определение прочности сцепления покрытия с основным металлом	103
4.4 Результаты исследования морфологии поверхности и химического состава покрытий	104
4.4.1 Результаты исследования морфологии поверхности покрытия	104
4.4.2 Результаты исследования химического состава покрытий	105

4.5 Результаты ускоренных сравнительных трибологических испытаний	107
4.6 Результаты коррозионных испытаний.....	109
4.7 Технология восстановления и упрочнения золотников гидрораспределителей типа Р160.....	110
4.7.1 Требования, предъявляемые к золотникам при восстановлении и упрочнении	110
4.7.2 Рекомендации к нанесению нанокomпозиционных электролитических покрытий на основе железа.....	111
4.7.3 Технология восстановления золотниковой пары с применением нанокomпозиционного электролитического покрытия на основе железа	112
4.8 Результаты стендовых испытаний	116
4.9 Результаты эксплуатационных испытаний	117
4.10 Прогнозирование остаточного ресурса гидрораспределителей	119
4.11 Выводы по разделу	123
5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ.....	126
5.1 Определение показателей экономической эффективности существующей и предлагаемой технологий	126
5.2 Определение технико-экономической эффективности технологии восстановления и упрочнения	133
5.3 Выводы по разделу	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	139
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	153
Приложение А	154
Приложение Б	165
Приложение В.....	166

Приложение Г	168
Приложение Д.....	169
Приложение Е	170
Приложение Ж.....	172
Приложение И	182
Приложение К.....	183
Приложение Л.....	187
Приложение М.....	191
Приложение Н	193
Приложение П	197

ВВЕДЕНИЕ

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 посева, 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 на который 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 его отказы из-за износа золотниковых пар определяют необходимость восстановления данного сопряжения, что в свою очередь обеспечит экономическую эффективность эксплуатации тракторов.

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 относятся электролитические.

При восстановлении золотниковых пар гидрораспределителей электролитическими способами выделяют железнение и хромирование, при этом для деталей с износами, превышающими 0,1 мм, предпочтительным является электролитическое железнение как более производительный и экономичный способ, позволяющий получать покрытия толщиной до 1,5 мм с исходной микротвердостью до 495 HV. 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} 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. Бахтиаров, 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. Шишурин и многие другие. 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.

Данная работа направлена на исследование процесса нанесения и определению основных физико-механических свойств нанокomпозиционных электролитических покрытий на основе железа с целью усовершенствования существующей технологии восстановления золотниковых пар гидрораспределителей.

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 нанокompозиционных электролитических покрытий и теоретически обосновать повышение ресурса золотниковых пар гидрораспределителей при восстановлении и упрочнении золотников нанокompозиционным электролитическим покрытием на основе железа.

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

4. Провести лабораторные исследования физико-механических свойств нанокompозиционного 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 P160, нанокompозиционное электролитическое покрытие на основе железа.

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

Научную новизну работы представляют:

- методика теоретической оценки ресурса сопряжения, восстановленного с применением нанокompозиционного электролитического покрытия, основанная на предлагаемой математической модели механизма упрочнения;
- установленные режимы электролиза и концентрация наноразмерных частиц в электролите для получения нанокompозиционного 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 нанокompозиционного электролитического покрытия на основе железа.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в предложенных аналитических зависимостях определения микротвердости 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, методы 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. Для подготовки электролита-суспензии на основе железа применяли ультразвуковой генератор УЗГ-2М. Покрyтия наносили на установке для нанесения композиционных электролитических покрытий собственного изготовления. Корректировку кислотности электролита осуществляли ионометрическим преобразователем И-500. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3. Металлографические шлифы изготавливали на алмазном отрезном станке SYJ-150, шлифовально-полировальном станке 3E881 «Neris». Морфологию и химический состав покрытий исследовали с помощью комплекса «Mira II Tescan», износостойкость – на машине трения МИ-1М. Испытания на коррозионную стойкость проводили с применением автоматизированной установки для коррозионных испытаний собственного изготовления, стендовые испытания – на модернизированном стенде КИ-4815М. При эксплуатационных испытаниях использовали средства 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 Р160 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, что подтверждается соответствующими дипломами (приложение А):

- 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» (г. Москва, 2015–2018 гг.);
- на конкурсе научно-инновационных работ молодых ученых и студентов ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова» (г. 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, рекомендованных ВАК РФ. 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.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Выбор объекта исследования

В настоящее время объем механизированных работ, связанных с сельскохозяйственным производством, составляет более 70 % от всех видов работ [117, 131]. Сельское хозяйство практически полностью перешло на механизированный способ выполнения операций с частичной автоматизацией отдельных процессов. Все сельскохозяйственные трактора, занятые при обработке полей, обслуживании животноводческих ферм, стоящие на вооружении комбинатов по переработке и хранению продуктов сельскохозяйственного производства, представляют собой сложные по конструкции системы, имеющие собственные силовые установки. Они являются дорогостоящими, материалоемкими объектами, нуждающимися в периодическом техническом обслуживании и ремонте.

Эксплуатация сельскохозяйственных тракторов в современных условиях приводит к неизбежному увеличению их наработки, а под действием внешней среды и нагрузочных факторов происходит постепенное изменение рабочих поверхностей деталей техники: появляется износ, увеличиваются зазоры, снижаются натяги в неподвижных посадках, возникают дополнительные вибрационные нагрузки и, как следствие, теряется работоспособность механизмов в целом [26, 123].

Распределение количества отказов по агрегатам и системам сельскохозяйственных тракторов представлено на рисунке 1.1 [7, 8, 26].

Из представленных данных (см. рисунок 1.1) видно, что большое количество отказов приходится на гидравлическую систему сельскохозяйственных тракторов, состоящую из насоса 1, гидрораспределителя 2, и гидроцилиндра 3, связанных между собой гидролиниями 4 (рисунок 1.2) [10, 22].

Обеспечить работоспособность гидравлической системы при определенных затратах на ремонт и техническое обслуживание возможно лишь на основе выполнения комплекса организационных и технических мер, а также хорошей подготовки ремонтного производства и соблюдения технологического процесса ремонта [23-25]. На техническое обслуживание и ремонт гидросистем затрачиваются большие

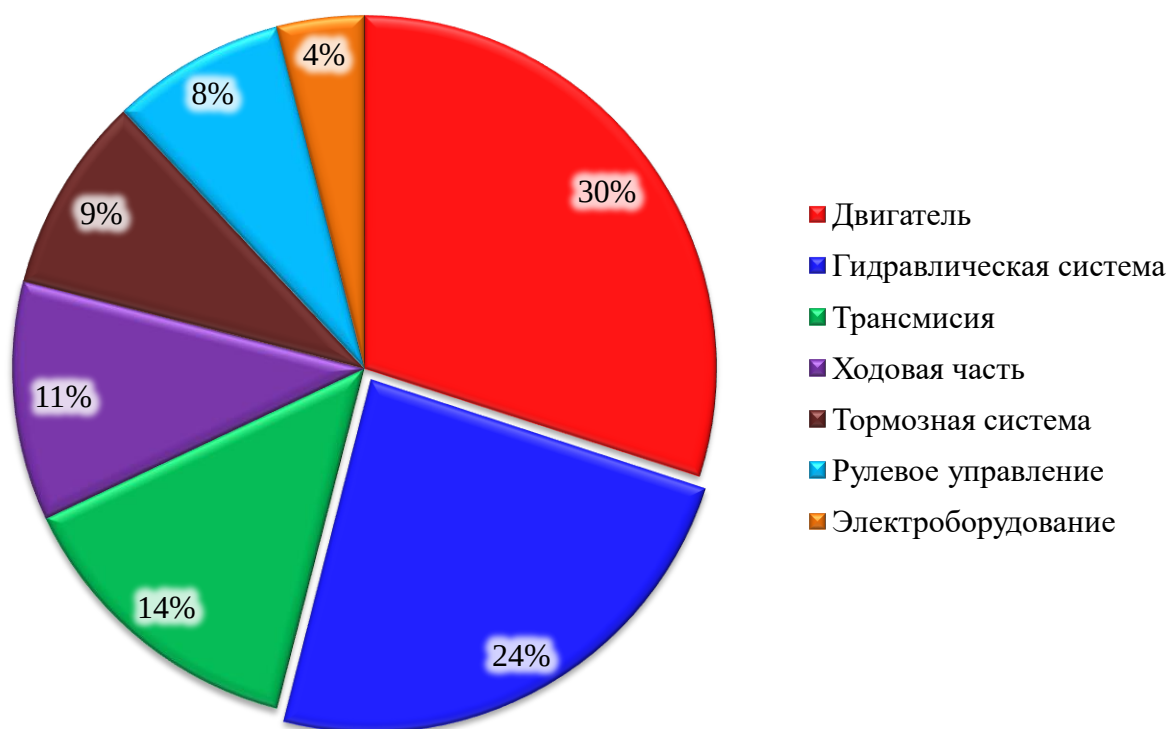


Рисунок 1.1 – Распределение количества отказов по агрегатам и системам сельскохозяйственных тракторов

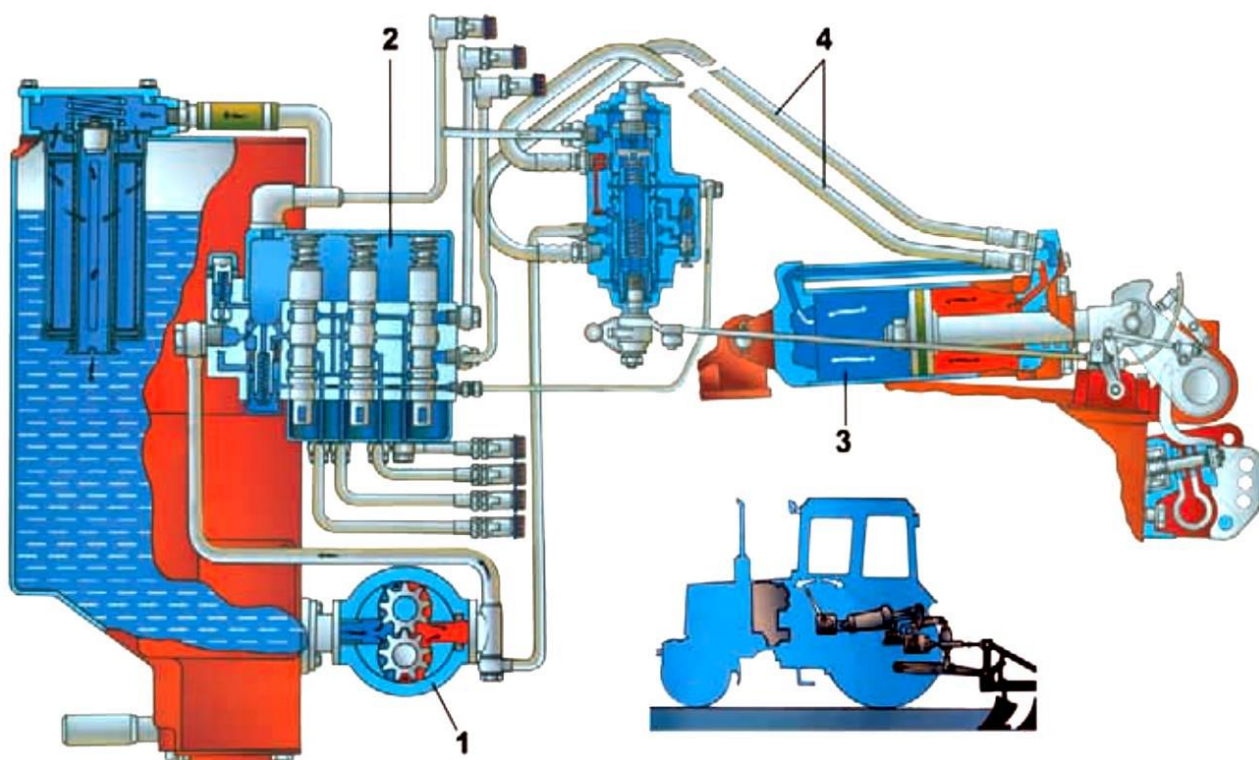


Рисунок 1.2 – Схема гидравлической системы сельскохозяйственных тракторов:
1 – насос; 2 – гидрораспределитель; 3 – силовой гидроцилиндр; 4 – гидролинии

материально-технические и трудовые ресурсы. От качества работы этой системы во многом зависят показатели эксплуатации тракторного парка, для повышения которых необходимо совершенствовать технологии ремонта агрегатов гидросистемы [24, 25, 117, 140, 141].

Широкое распространение гидравлических систем объясняется целым рядом их преимуществ по сравнению с другими типами приводов: небольшая масса, бесступенчатое регулирование скорости рабочих органов, независимое расположение элементов, надежное предохранение от нагрузок, удобство обслуживания и управления, легкость автоматизации процессов и др [89]. Долговечность гидросистем сельскохозяйственных тракторов определяется ресурсом наиболее сложных и ответственных агрегатов – гидрораспределителя, гидронасоса, силового цилиндра [22, 23, 107, 127, 140].

Распределение отказов наиболее часто встречающихся среди элементов гидравлической системы представлено на рисунке 1.3 [128]:

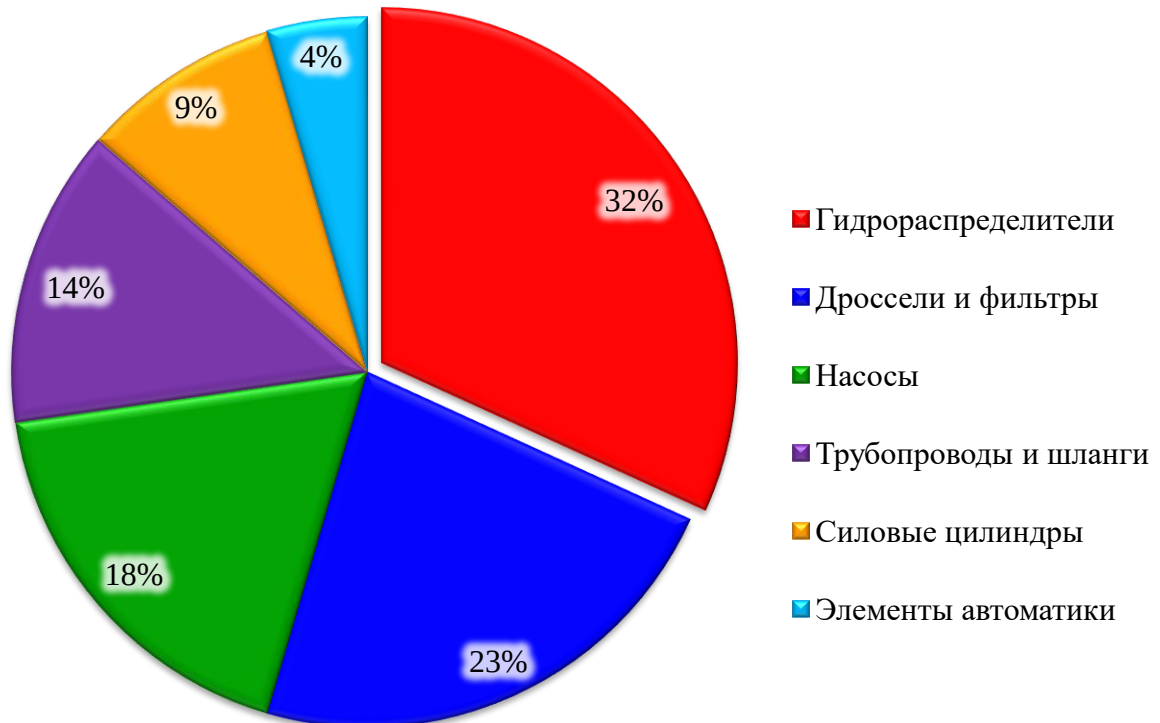


Рисунок 1.3 – Распределение неисправностей гидравлических систем сельскохозяйственных тракторов

Из представленной диаграммы видно, что наибольшее количество отказов в гидравлических системах приходится на гидрораспределители.

Клапанно-золотниковые гидравлические распределители предназначены для распределения потока жидкости к рабочим органам, удержания их в поднятом состоянии, разгрузки насоса путем холостого перепуска рабочей жидкости в бак, предохранения всей гидросистемы от перегрузки [24, 30]. Средний нормированный ресурс клапанно-золотниковых распределителей, устанавливаемый заводом-изготовителем, составляет 5000 мото-ч, что соответствует 250 тыс. циклам включений [114–116]. Однако в условиях эксплуатации значения ресурса гидрораспределителей значительно ниже. В.Е. Черкун [141] отмечал, что средний доремонтный ресурс гидрораспределителей Р80 составляет около 2500 мото-ч, а по данным В.А. Дидура и В.Я. Ефремова [64] – 1400 мото-ч, что значительно ниже нормируемого [24].

По данным министерства сельского хозяйства Саратовской области в 2018 году в области было зарегистрировано порядка 4000 единиц сельскохозяйственных тракторов оснащённых гидрораспределителями типа Р160. Это трактора К-700, К-701 и их модификации, а также Т-150. В связи с этим разработка технологии восстановления и упрочнения наиболее ответственных элементов данного гидрораспределителей является актуальной задачей.

Главными задачами гидрораспределителя в процессе работы являются распределение рабочей жидкости под высоким давлением к силовым цилиндрам и своевременное, быстрое отсечение потока рабочей жидкости перепуском избыточного давления [30, 87]. Эти задачи выполняются через прецизионные пары: «золотник – корпус», «перепускной клапан – направляющая» (рисунки 1.4).

Прецизионная пара «перепускной клапан – направляющая» работает только при переводе золотника в положения «подъем» и «опускание» из нейтрального положения и имеет небольшой износ [139].

В процессе эксплуатации интенсивнее всего изнашивается золотниковая пара, которая является основным рабочим сопряжением гидрораспределителя, так как величина зазора в данной паре определяет нормальную работу всей гидросистемы [2, 64, 124].

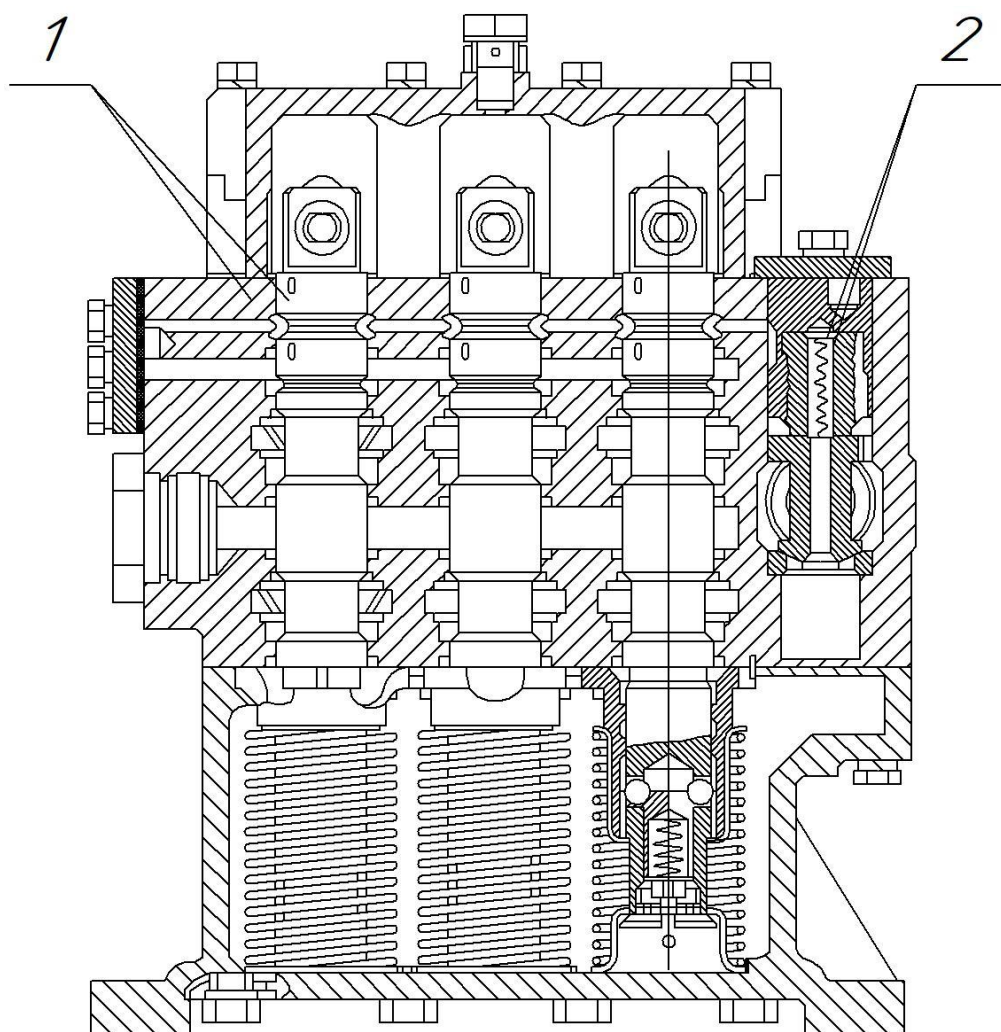


Рисунок 1.4 – Прецизионные пары гидрораспределителя Р160:

1 – «золотник – корпус»; 2 – «перепускной клапан – направляющая»

Основным дефектом, лимитирующим нормальную работу гидрораспределителя Р160, является наличие утечек рабочей жидкости через диаметрально расположенные зазоры между цилиндрическими отверстиями в корпусе и поясками золотника, которые в процессе эксплуатации увеличиваются из-за изнашивания [87, 124]. В связи с вышеизложенным необходимо изучить материал, термообработку, условия работы, вид и степень изнашивания золотниковой пары в процессе эксплуатации, а также существующие способы ее восстановления.

1.2 Материал, термообработка и технические требования, предъявляемые к золотниковым парам P160

С целью уменьшения интенсивности изнашивания золотниковой пары, золотник и корпус гидрораспределителя P160 изготавливают из следующих материалов: корпус – из серого чугуна СЧ 21 ГОСТ 1412–85 с твердостью HV 179...252 [33]; золотник – из стали 15Х ГОСТ 4543–2016 с химикотермической обработкой до твердости HV 655...800 [44].

Применение вышеуказанных материалов для изготовления деталей золотниковой пары обеспечивает им высокую твердость, износостойкость, коррозионную стойкость, сохранение стабильности размеров и геометрической формы [54, 83]. Химический состав и физико-механические свойства данных материалов представлены в таблицах 1.1–1.6.

Таблица 1.1 – Химический состав стали 15Х

В процентах

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,12–0,18	0,17–0,37	0,4–0,7	до 0,3	до 0,035	до 0,035	0,7–1,0	до 0,3

Таблица 1.2 – Механические свойства стали 15Х при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

σ_B , Н/мм ²	σ_T , Н/мм ²	δ_5 , %	ψ , %	KCU, кДж/мм ²
690	490	12	45	69
Твердость 15Х после отжига, ГОСТ 4543–2016			HV = 188	
Твердость 15Х негартованного, ГОСТ 4543–2016			HV = 228	

Таблица 1.3 – Физические свойства стали 15Х

T , $^{\circ}\text{C}$	E , 10^{-5} , МПа	α , 10^6 , $1/^{\circ}\text{C}$	λ , Вт/(м· $^{\circ}\text{C}$)	ρ , кг/м ³	C , Дж/(кг· $^{\circ}\text{C}$)
20	2,15	–	44	7830	–
100	2,12	10,2	44	7810	496

Таблица 1.4 – Химический состав чугуна СЧ 21

В процентах

C	Si	Mn	S	P
3,3–3,5	1,4–2,4	0,7–1,0	не более 0,15	не более 0,2

Таблица 1.5 – Механические свойства чугуна СЧ 21 при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU, кДж/м ²
200	–	–	–	–
Твердость СЧ21, ГОСТ 1412–85			HV = 179–252	

Таблица 1.6 – Физические свойства чугуна СЧ 21

T , $^{\circ}\text{C}$	E , 10^{-5} , МПа	λ , Вт/(м $\cdot^{\circ}\text{C}$)	ρ , кг/м ³
20	0,85–1,0	54	7100

В таблицах 1.1–1.6 приняты следующие обозначения:

σ_B – предел кратковременной прочности, МПа;

σ_T – предел пропорциональности (предел текучести для остаточной деформации), МПа;

δ_5 – относительное удлинение при разрыве, %;

ψ – относительное сужение, %;

KCU – ударная вязкость, кДж/м²;

HV – твердость по Виккерсу;

T – температура, при которой получены данные свойства, $^{\circ}\text{C}$;

E – модуль упругости первого рода, МПа;

α – коэффициент температурного (линейного) расширения (диапазон $20^{\circ} - T$), $1/^{\circ}\text{C}$;

λ – коэффициент теплопроводности (теплоемкость материала), Вт/(м $\cdot^{\circ}\text{C}$);

ρ – плотность материала, кг/м³;

C – удельная теплоемкость материала (диапазон $20^{\circ} - T$), Дж/(кг $\cdot^{\circ}\text{C}$).

В связи со специфическими условиями работы золотниковой пары гидрораспределителя к ней предъявляют повышенные требования стабильности размеров, высокой износостойкости рабочих поверхностей, прочности и допустимым термическим и монтажным деформациям их деталей. Выполнение этих требований достигают с помощью различных видов термической обработки – азотирование, цементация, искусственное старение, обработка холодом, поверхностная закалка [2, 10, 30, 87, 89, 98, 118, 125].

Азотирование осуществляют для получения высокой твердости и износостойкости поверхностного слоя детали, повышения предела усталостной прочности или коррозионной стойкости [1, 123]. Сущность процесса заключается в насыщении стали азотом, который при температуре от 500 до 600 °С находится в атомарном состоянии и образует с железом химические соединения – нитриды, придающие азотированной стали твердость до HV 698 [1, 27]. В процессе термообработки при температуре 500 °С азот диффундирует вглубь металла на 0,01 мм/ч. При высоких требованиях к механическим свойствам сердцевины деталь до азотирования подвергают закалке с высоким отпуском.

Благодаря высокой твердости азотированного слоя и наличию в нем остаточных напряжений сжатия, предел выносливости детали, особенно имеющей концентраторы напряжений, существенно повышается [123]. Начало усталостного разрушения приходится на границу азотированного слоя с не азотированной сердцевиной, поэтому сопротивление усталостному разрушению детали тем выше, чем толще азотированный слой [12, 125]. Азотированная поверхность имеет высокую твердость, износостойкость, коррозионную стойкость, хорошую полируемость; свойства азотированной поверхности сохраняются практически неизменными при повторных нагревах вплоть до 600 °С [1].

Существенным недостатком азотирования является очень низкая скорость протекания процесса и как следствие небольшая толщина азотированного слоя. Для ускорения процесса диффузии при азотировании используют воздействие ультразвуковых колебаний, нагрев деталей токами высокой частоты и тлеющий разряд.

Цементация заключается в насыщении поверхностного слоя малоуглеродистой стали углеродом с целью повышения твердости, износостойкости и получения вязкой сердцевины. В зависимости от среды, в которой протекает процесс, различают цементацию в твердом, жидкостном и газообразном карбюризаторах [110].

Цементация в твердом карбюризаторе осуществляется прогревом деталей, упакованных чаще всего в смеси активированного древесного угля в зернах диаметром 3,5...10 мм. Она происходит при температуре 900...950 °С [8]. Для ускорения цементации в смесь добавляют от 10 до 40% углекислого бария и углекислого натрия, или от 5 до 20% нитрита кобальта. Глубина науглероженного слоя зависит от продолжительности процесса [1].

Жидкая цементация осуществляется в ваннах из расплавленных солей углекислого натрия от 75 до 85%, поваренной соли от 10 до 15% и карбида кремния (5–10 %). Температуру ванны поддерживают 860 °С. Обрабатываемые детали в стальных корзинах или ковшах погружают в ванну и выдерживают в ней в течение 3 ч. В зависимости от продолжительности цементации глубина диффузии может достигать от 0,2 до 1,0 мм [7, 118]. Для повышения производительности цементации все чаще используют ультразвук, применение которого частотой от 20 до 30 Гц с удельной мощностью 1000 кВт/м² увеличивает толщину слоя до 2,5 раза по сравнению с обычной жидкостной цементацией [110].

Газовая цементация по сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе имеет ряд существенных преимуществ: повышение производительности процесса, сокращение потребности в рабочей силе и производственных площадях, большая возможность регулирования параметров процесса, а, следовательно, толщину и насыщенность цементированного слоя и т. д. Газовую цементацию обычно проводят в шахтных (муфельных и безмуфельных) и методических (безмуфельных) печах. Установлена возможность ускорения и контроля процесса цементации в шахтных печах с помощью кислородсодержащих добавок.

Добавка водного раствора перекиси водорода совместно с карбюризатором ускоряет процесс цементации в шахтных печах на 25–30 %. Кроме того, углеродный потенциал атмосферы легко регулируется изменением скорости подачи или концентрации водного раствора перекиси водорода.

При добавлении к природному газу перекиси водорода 15–30%-й концентрации имеет место заметное увеличение эффективной толщины цементированного слоя (с концентрацией до 0,4 %). При температуре от 850 до 1000 °С этом цементация производится на толщину от 0,5 до 4,0 мм. Твердость цементированной стали до 698 HV. Термическая обработка после процесса цементации - двойная закалка и отпуск [1]:

- закалка ТВЧ при температуре 1040 °С;
- отпуск с нагревом ТВЧ до 700 ± 10 °С.

Основные недостатки цементации заключаются в большой длительности, высокой трудоемкости и нерегулируемости процесса, а также в большом расходе электроэнергии, возможности перенасыщения поверхностного слоя углеродом.

Искусственное старение относится к термической обработке, при которой в закаленной стали происходит распад пересыщенного твердого раствора [110]. Процесс происходит при высоких температурах. Схема искусственного старения включает в себя нагрев до 150 °С и выдерживание в нагретом состоянии в течение 35 ч. Выдерживание в нагретом состоянии позволяет, не снижая твердости закаленной стали, стабилизировать состояние углерода в ее структуре за счет выделения его в виде карбидов [125].

Обработка холодом является термической обработкой, в результате которой при погружении закаленных деталей в среду, имеющую температуру ниже нуля, происходят изменения напряженности. После погружения и выдержки детали располагают на открытом воздухе. Выдерживают на открытом воздухе при обработке холодом в течение времени, необходимого для полного охлаждения всей детали и выравнивания температуры по сечению. Охлаждение изделия до отрицательных температур производят в смеси твердой углекислоты («сухой лед») со спиртом, обеспечивающей охлаждение до $-78,5$ °С, либо в жидком азоте (-196 °С) [118].

В результате обработки холодом за счет превращения остаточного аустенита в мартенсит повышаются твердость и износостойкость. Кроме того, при обработке холодом стабилизируются размеры, что положительно сказывается на прецизионных деталях, таких, как золотник [125].

Поверхностная закалка проводится методом кратковременного нагрева поверхностного слоя металла до температуры закалки и последующего быстрого охлаждения. При этом скорость нагрева должна быть настолько высокой, что тепло не должно распространиться вглубь детали; в противном случае происходит объемная закалка изделия. Целью поверхностной закалки при индукционном нагреве является получение изделия с твердым износоустойчивым поверхностным слоем и сравнительно мягкой и вязкой сердцевиной.

Индукционная закалка токами высокой частоты (ТВЧ) получила достаточно широкое распространение. Ее сущность заключается в помещении детали в переменное магнитное поле высокой частоты (от 200 до 500 тыс. Гц), тогда в поверхностном слое металла генерируются индукционные вихревые токи (токи Фуко), разогревающие поверхность со скоростью до 1000 °C/с [78]. Толщина слоя, в котором выделяется тепло, зависит от частоты тока. С ее увеличением толщина слоя уменьшается. Поэтому чем больше частота тока, тем тоньше получается закаленный слой. Однако вследствие теплопроводности глубина закаленного слоя несколько превышает глубину проникновения тока и составляет обычно от 1 до 2 мм [1].

Режим закалки ТВЧ приводит к образованию на поверхности мелкоигльчатого мартенсита с высокими показателями твердости и прочности, что вызывает в поверхностном слое высокие остаточные напряжения. В связи с этим после закалки ТВЧ детали обязательно подвергают низкотемпературному отпуску [73].

Длительность нагрева поверхности до закалочных температур составляет обычно от 3 до 5 с. Поверхностная закалка ТВЧ достаточно хорошо автоматизируется, в связи с чем является высокопроизводительной и легко встраивается в любую технологическую линию изготовления детали [96].

В работах авторов Барышева В.И., Бахтиарова Н.И., Кипера Е.В. и Мясоедова Н.С. [7, 13, 70, 98] отмечается, что надежность работы гидрораспределителя Р160 зависит как от точности изготовления прецизионных деталей, так и от качества их сборки. В связи с этим, а также в связи со специфическими условиями работы распределителя детали золотниковой пары должны отвечать требованиям ГОСТ 27.002–2015 [40].

Долговечность прецизионных деталей во многом зависит от физико-механических свойств рабочей жидкости. Требования к рабочей жидкости следующие [91, 119]:

- температура в эксплуатационном режиме 50...80 °С;
- вязкость – 60–70 мм²/с;
- наличие механических примесей 0,016–0,2 % (16 класс) по ГОСТ 17216–2001 [34];
- хорошая смазывающая способность, химическая нейтральность к деталям, неокисляемость, малое пенообразование и ряд менее значительных факторов;
- очистка рабочей жидкости должна осуществляться эффективным способом с тонкостью фильтрации более 25 мкм.

Из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что общие требования, предъявляемые к золотниковым парам гидрораспределителей определяются материалом и качеством изготовления, проведенной термообработкой, состоянием рабочей жидкости и способами ее очистки и защиты от загрязнений.

1.3 Характер, величина износа и механизм изнашивания золотниковой пары гидрораспределителя Р160

Эксплуатация гидросистем сельскохозяйственных тракторов неизбежно происходит в условиях повышенной запыленности окружающего воздуха [69, 107, 124]. Твердые частицы загрязнений, попадая в зазоры прецизионных соединений, вызывают изнашивание сопрягаемых деталей, а также из-за появления повышенных сил трения они заклинивают детали распределительной и регулирующей аппаратуры [5, 91]. Надежная работа гидросистем сельскохозяйственных тракторов во многом зависит от качества рабочей жидкости [119]. К параметрам гидросистемы, существенно влияющим на изменение физико-химических свойств рабочей жидкости, относят: степень аэрации и вентиляции бака, температурный и силовой режимы работы гидросистемы.

С аэрацией и вентиляцией бака связаны увеличение притока и диффузия

воздуха в рабочую жидкость. Это усиливает его растворимость в рабочей жидкости и, следовательно, ускоряет окисление жидкости, и засорение ее частицами пыли, находящимися в воздухе. Так, по данным П.А. Власова, Е.Г. Рыляткина, В.Е. Черкуна [26, 119, 140], при пахоте за 7-часовой рабочий день в бак гидросистемы трактора третьего класса может поступить объем воздуха, содержащий от 0,2 до 3,4 г/м³ пыли.

Профессором В.Е. Черкуном [140, 141] установлено, что при выполнении сельскохозяйственных работ на тракторах с навесными, полунавесными и прицепными гидрофицированными машинами через сапун в бак гидросистемы сельскохозяйственного трактора поступает до 0,3...0,35 м³/ч воздуха, в 1 м³ которого содержится от 0,16 до 160 г пыли (в зависимости от условий работы).

Согласно П.А. Власову [26], трактор Т-150, имеющий наработку 600 мото-ч, имеет в гидробаке 5,526 г пылевидной массы. При различных работах, выполняемых мобильными машинами, велика степень насыщения воздуха вокруг них пылью. При пахоте она составляет 0,05...1,1 г/м³; при севе – 0,2...2,5 г/м³; культивации – 0,9...2,2 г/м³; при транспортных работах – до 2,1 г/м³; при планировании земель – до 3,15 г/м³. Основная ее часть (62–63 %) – окись кремния – наиболее агрессивный абразивный компонент, имеющий твердость в 2–3 раза выше твердости многих сталей [54, 57].

Средняя концентрация загрязнения рабочей жидкости в гидравлической системе составляет 0,071 % по массе [140]. Концентрацию загрязнения рабочей жидкости от 0,06 до 0,08 % имеют 31 % гидросистем, от 0,05 до 0,09 % – 57,6 % и от 0,04 до 0,1 % – 78 %. Анализ частиц загрязнителя на дисперсный состав показал, что в основном (около 95 %) они имеют размер до 10 мкм, 10...25 мкм (3–5 %), 25...50 мкм (около 2 %) [141].

Такие исследователи, как В.И. Барышев, Г.Л. Кальбус, Н.С. Мясоедов, В.З. Сергеев, Т.А. Сирицын [10, 69, 98, 125, 130] считают, что загрязнение рабочей жидкости абразивом – наиболее отрицательное явление процесса эксплуатации гидросистем мобильных машин. Известно [75, 79-81, 137], что гидроабразивное изнашивание – это механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц, взвешенных в жидкости и пе-

ремещающихся относительно изнашиваемого тела. В условиях гидроабразивного изнашивания сроки службы машин сокращаются от 2 до 10 раз [98, 125].

От степени износа золотниковой пары гидрораспределителя зависят нормальная работа гидрораспределителя и трудоемкость восстановления [73, 81]. Основными дефектами золотниковой пары являются размерный износ и искажение геометрической формы: для корпуса – овальность, конусность и бочкообразность, а для золотников – конусность и седлообразность [2, 140].

В корпусах изнашиваются рабочие пояски отверстий под золотники (рисунок 1.5) [141]. Отверстия корпусов изнашиваются неравномерно в продольном и поперечном сечениях. В первом случае наблюдается ступенчатый износ поясков отверстий, а во втором преобладает овальная форма. Величина ступени на отдельных поясках достигает 0,01–0,02 мм и более, а величина некруглости – 0,012–0,019 мм. По длине и в поперечном сечении пояски изнашиваются неравномерно – от 0,023 до 0,066 мм. Овальность отверстий в различных сечениях тоже неодинакова и достигает 0,048 мм. Длина наиболее изношенной части поясков отверстий совпадает с величиной перекрытия поясками золотника в положениях «нейтральное» и «плавающее». Максимальное значение износа отверстий в корпусе под золотник обычно достигает 0,09 мм, однако на их поверхности бывают царапины и риски глубиной до 0,12 мм [13-15, 140].

Золотники изнашиваются по поверхностям рабочих поясков (рисунок 1.6), сопряженных с отверстиями корпуса. На изношенных поверхностях наблюдаются блестящая и матовая зоны поясков. Появляются также царапины вдоль всех поясков, следы схватывания поверхностей. Среднее значение износа золотников 0,014 мм, максимальное – 0,08 мм.

Исходя из представленных данных можно составить схему износного состояния золотниковой пары гидрораспределителя Р160 (рисунок 1.7).

Таким образом, при эксплуатации гидрораспределителя основными показателями износа прецизионных пар являются изменения диаметров и геометрических форм поясков золотника и корпуса гидрораспределителя.

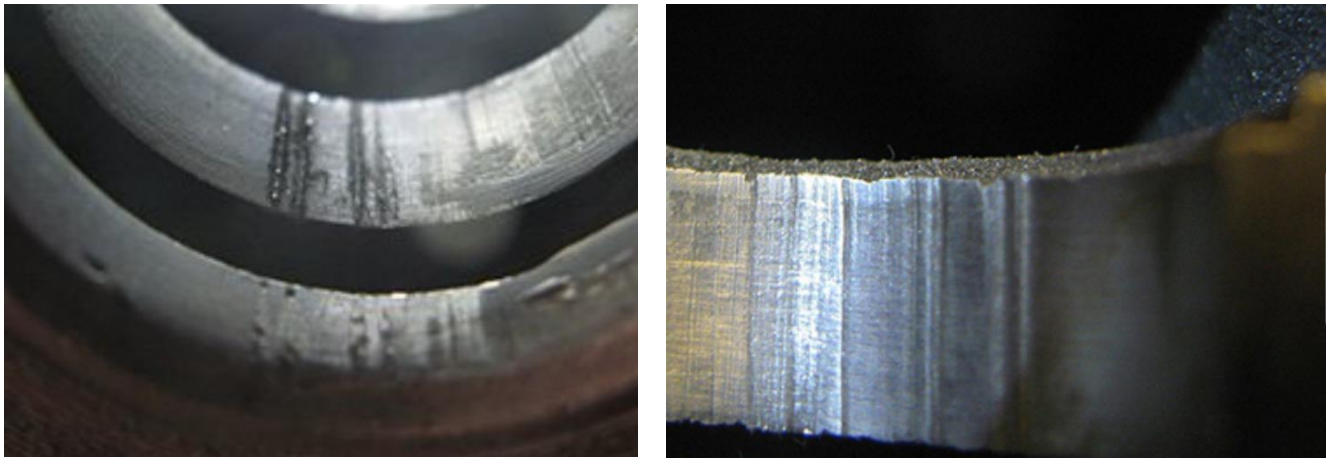


Рисунок 1.5 – Изношенная поверхность рабочих поясков отверстий корпуса гидрораспределителя Р160

Причины нарушения геометрической формы деталей золотниковых пар определяются в основном гидроабразивным износом при содержании механических примесей в гидравлической жидкости.

Из представленных данных видно, что наибольший суммарный износ, возникающий в золотниковой паре гидрораспределителя Р160, может достигать значений 0,2 мм, поэтому для восстановления ее работоспособности должна существовать возможность создания слоя покрытия на поясках золотников размером 0,25-0,3 мм (с учетом припусков на механическую обработку золотников и корпуса) с высокой износо- и коррозионной стойкостью.

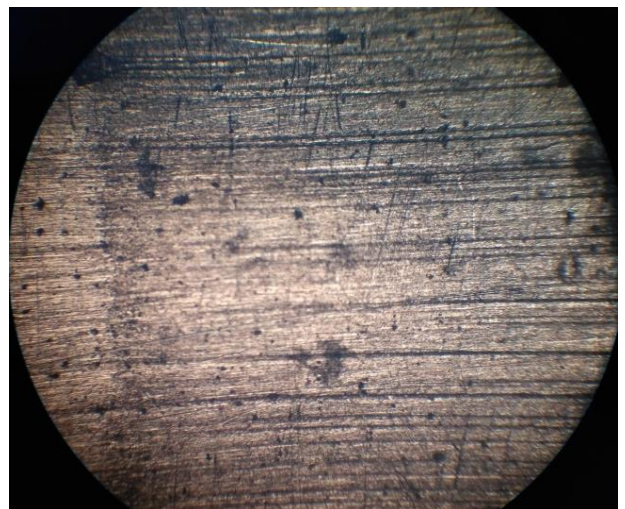


Рисунок 1.6 – Изношенная поверхность рабочих поясков золотника гидрораспределителя Р160

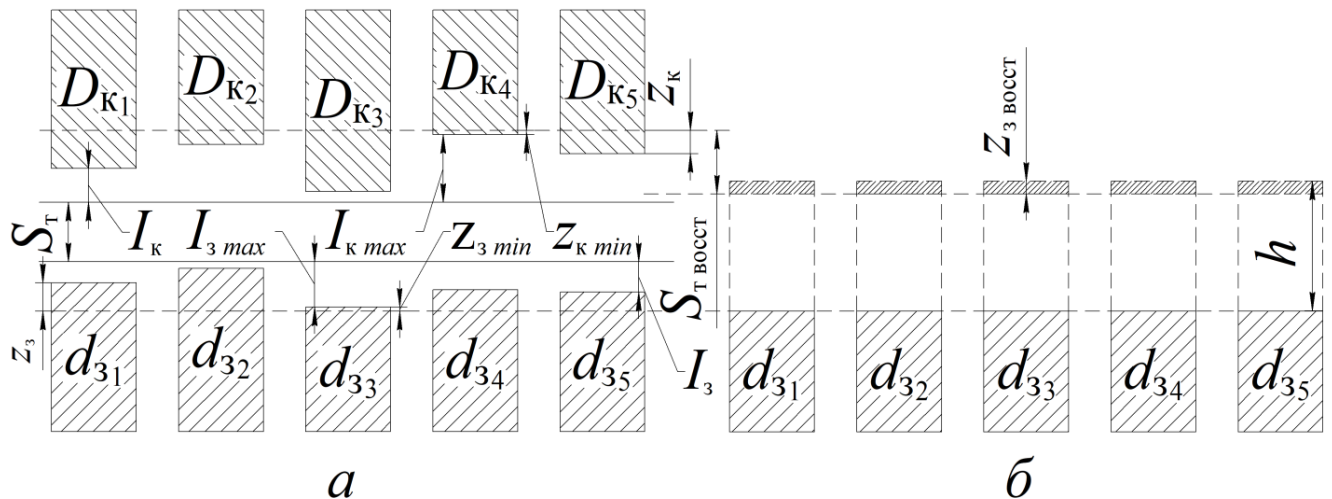


Рисунок 1.7 – Схема износного состояния (а) и восстановления (б) золотниковой пары гидрораспределителя Р160: $D_{K1} \dots D_{K5}$ – диаметральные размеры поясков корпуса; $d_{31} \dots d_{35}$ – диаметральные размеры поясков золотника; I_K, I_3 – износы поясков корпуса и золотника соответственно; $I_{K \max}, I_{3 \max}$ – максимальные износы корпуса и золотника соответственно; S_T – технологический зазор золотниковой пары; $S_{T \text{ ВОССТ}}$ – восстановленный технологический зазор золотниковой пары; Z_K, Z_3 – припуски на механическую обработку поясков корпуса и золотника соответственно; $Z_{K \min}, Z_{3 \min}$ – минимальные припуски на механическую обработку наиболее изношенного пояска корпуса и золотника соответственно; $Z_{3 \text{ ВОССТ}}$ – припуски на механическую обработку поясков золотника после восстановления; h – толщина наносимого слоя электролитического покрытия; $D_K = 32^{+0,080}$ мм; $d_3 = 32^{-0,025}$ мм; $I_{K \max} = 0,12$ мм; $I_{3 \max} = 0,08$ мм

1.4 Анализ способов восстановления работоспособности золотниковых пар гидрораспределителей Р160

Существующие способы предусматривают восстановление прецизионных деталей гидрораспределителей в основном с применением вспомогательных материалов (рисунок 1.8) [8, 9, 27, 28, 63, 66, 70, 94, 107, 126, 139, 143, 145].

1.4.1 Восстановление корпуса

Поступающие в ремонт корпуса гидрораспределители Р160 дефектуют. Корпуса с трещинами бракуют, если трещины проходят через внутренние каналы. Выбоины на плоскостях прилегания верхней и нижней крышек корпусов не

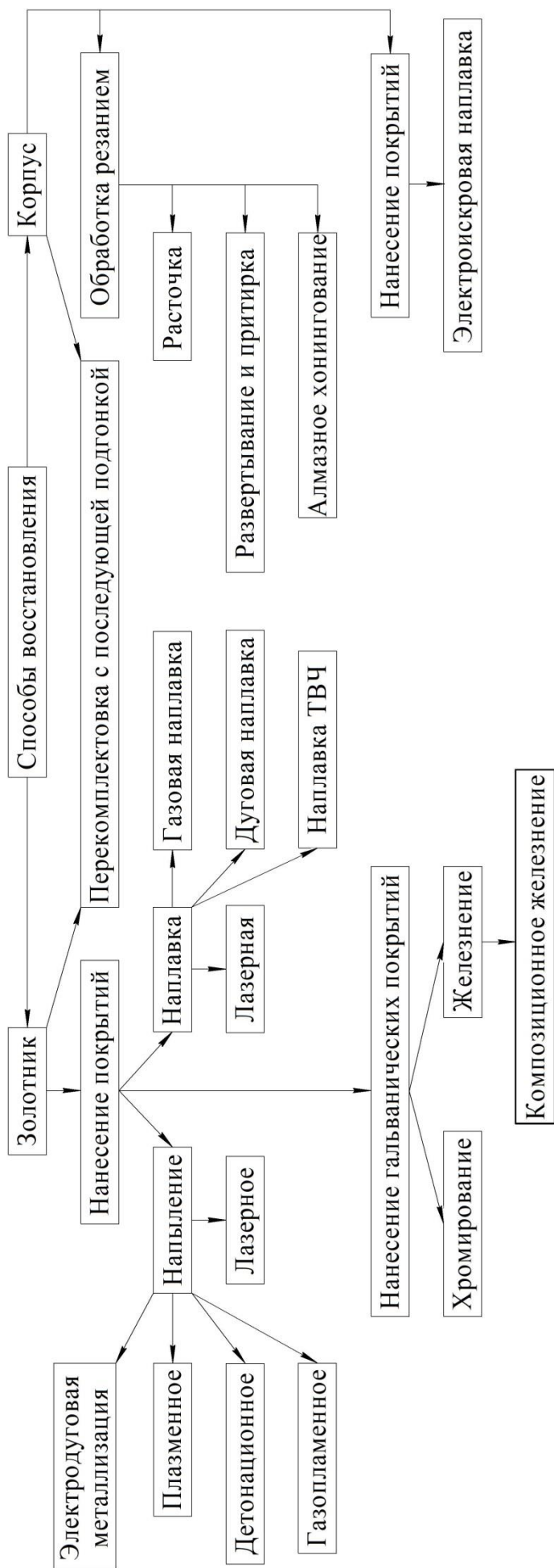


Рисунок 1.8 – Анализ способов восстановления рабочих поверхностей золотниковой пары гидрораспределителя Р160

допускаются, их устраняют обработкой на плоскошлифовальном станке. При отсутствии браковочных признаков, износ отверстий под золотники является основным дефектом, требующим восстановления [140].

При незначительных износах отверстий под золотники корпусов (менее 0,01 мм) их разделяют на размерные группы и восстанавливают за счет комплектования с последующей доводкой совместно с золотником [118].

При значительных износах отверстий под золотники корпуса (более 0,01 мм) их геометрическую форму восстанавливают расточкой, развертыванием с последующей доводкой или алмазным хонингованием [141].

Доводку отверстий корпусов выполняют ручными притирами или на вертикально-доводочных станках с закреплением притира в патроне. Сначала притирают 30-микронной пастой. Для чистовой доводки используют 7-микронную пасту. Замеряют диаметры поясков восстановленных отверстий пневматическим длинномером или индикаторным нутромером и разделяют отверстия корпусов под золотники на 18 размерных групп через 0,004 мм. Искажение геометрической формы не должно превышать 0,004 мм [140].

Для операции расточки отверстий с последующей доводкой характерным является довольно большой разброс диаметров, часто выходящих за регламентированные размерные группы. Кроме того, если появляющаяся после расточки корсетность не оказывает заметного влияния на геометрию отверстия, то на конечной операции доводки появляется бочкообразность, которая приводит к повышенному износу отверстий под золотник. Развертывание, по сравнению с расточкой отверстий, снижает поле рассеивания размера в несколько раз [70]. Вместе с улучшением геометрии отверстия величина шероховатости обработанной поверхности так же улучшается и соответствует $Ra = 1,15$ мкм. Последующая доводка дополнительно уменьшает этот показатель до $Ra = 0,15$ мкм, но увеличивает поле рассеивания диаметра в 1,5 раза, при этом наблюдается ухудшение геометрии [69].

Наиболее предпочтительным при восстановлении геометрии отверстий корпусов гидрораспределителей является алмазное хонингование [141]. Проводится оно на вертикально-хонинговальных станках в две операции: предварительное хонингование

и окончательное хонингование. Для предварительного хонингования применяют бруски крупной зернистостью, а для окончательного соответственно мелкой зернистостью. Припуск на окончательное хонингование составляет 0,005–0,008 мм. В результате полного цикла хонингования шероховатость обрабатываемой поверхности достигает значений $Ra = 0,04$ мкм. Так же при проведении данной операции отпадает необходимость предварительного исправления геометрии изношенных отверстий и происходит значительное повышение точности обработки. Диапазон поля рассеивания диаметральных размеров сокращается в 1,5 раза, а диапазон рассеивания овальности и конусности – в 2 раза по отношению к разворачиванию [70].

Таким образом, алмазное хонингование большинством исследований [1, 5, 70, 118, 140] рекомендуется в качестве предпочтительной операции при восстановлении отверстий корпусов гидрораспределителей под золотники.

1.4.2 Восстановление золотника

Поступившие в ремонт золотники гидрораспределителя Р160 дефектуют. Золотники с трещинами, пробоинами, существенными задирами, скручиванием, короблением бракуют. При отсутствии браковочных признаков, износ поясков золотника является основным дефектом, требующим устранения [13-15]. При несущественных величинах износа поясков (менее 0,01 мм) проводят их шлифование на бесцентрошлифовальных станках до полного устранения износа и последующую доводку и комплектование с соответствующими отверстиями корпуса [12]. В случаях значительного износа рабочих поясков (более 0,01 мм) их восстанавливают нанесением слоя металла электроискровой обработкой, газовой и дуговой наплавкой, напылением порошков и металлов, а также электролитическими способами с последующим шлифованием и доводкой [27]. Доводка подразделяется на черновую и чистовую. Черновую доводку производят 30-микронной пастой на притирочных станках с чугунными разрезными притирами, на поверхность которых наносят пасту, а чистовую, по аналогии с черновой, при этом используя 7-микронную пасту. После чистовой доводки золотники распределяют на размерные группы с интервалом 0,004 мм и проводят комплектацию методом селективной

сборки с корпусом гидрораспределителя. При этом золотники, имеющие размеры поясков меньше, чем в размерных группах на изготовление, направляются на восстановление с нанесением слоя металла [125].

Электроискровую обработку ведут электродом из меди или с применением сварочной проволоки СВ08Г2С, с последующей механической обработкой, включающей лейзвийную развертку с последующей доводкой на чугунном притире [68]. Однако главным недостатком данного метода является невысокие физико-механические показатели получаемого слоя и как следствие низкий ресурс восстановленного сопряжения.

Наплавку выполняют с применением специальных наплавочных электродов или наплавочной проволоки [63, 68]. Важными недостатками наплавки являются низкая производительность, непостоянное качество наплавленного слоя, так как наплавку выполняет работник, тяжелые условия труда, неудовлетворительная защита плакирующего металла от окисления [28].

При проведении автоматической дуговой наплавкой можно избежать описанных выше недостатков, так как исключается влияние индивидуального мастерства работника. Данный способ широко применяют для восстановления и изготовления деталей тракторов и машин. Однако существенными недостатками, ограничивающими применение данного способа, являются значительное проплавление и перемешивание основного и плакирующего металлов, сложность качественного замыкания сварного шва при наплавке кольцевых деталей [63, 138].

В последние года достаточно большое распространение получили методы напыления порошком и металлов на восстанавливаемую поверхность. При этом у нанесенного слоя наблюдаются проявления специальных свойств [134, 143]. К числу наиболее перспективных способов можно отнести электродуговое, плазменное, газопорошковое и детонационное напыление [126].

Электродуговое напыление не требует применения сложного технологического оборудования. Необходимый химический состав слоя можно обеспечить подбором специальных проволок. При силе тока 750 А стальное покрытие образуется со скоростью 36 кг/ч, что делает данный способ достаточно производительным. К не-

достаткам данного способа можно отнести перегрев и окисление напыляемого материала при малых скоростях подачи распыляемой проволоки, слабая адгезия нанесенного слоя, высокая пористость покрытия и пр. При этом происходит выгорание легирующих элементов вследствие выделения большого количества теплоты в процессе горения дуги. Данный способ может быть эффективен при значительных покрываемых площадях на массивных деталях [96, 143].

Плазменное напыление, по сравнению с электродуговым, обладает важными преимуществами [143, 145]. Регулирование скорости и температуры плазменной струи методом подбора конструкции плазмотрона и режимов напыления расширяет диапазон применяемых материалов. Покрытия получаются достаточно плотными, с хорошим сцеплением с основой. Однако сравнительно низкая производительность, шум, интенсивное ультрафиолетовое излучение и сложное технологическое оборудование – недостатки, которые ограничивают широкое применение данного способа.

Детонационное напыление осуществляют посредством специализированных пушек, в которые укладывают последовательно взрывчатую смесь и напыляемый материал. Воспламенение взрывчатой смеси производят искрой. Высокая скорость движения и сильный разогрев частиц обеспечивают получение достаточно плотного и прочного покрытия. Напыление таким методом можно наносить только на изделия, не подверженные деформированию от воздействия образующийся ударной волны. Сильный шум, достигающий 140 дБ, при проведении напыления требует расположения пушек в камере с двойными стенами, при этом наблюдение осуществляют через смотровое окно [63, 126]. Данный способ является низкопроизводительным и по показателям эргономики практически не используется в ремонте производстве.

Электролитическое покрытие на изношенные пояски золотников наносят двумя способами: железнением и хромированием. В связи с тем, что электрохимический эквивалент железа равен 1,042 г/л-ч, а хром 0,324 г/л-ч [127], выход тока при нанесении покрытия на основе железа до 5 раз выше, чем при хромировании, поэтому как более производительный и экономичный способ железнение более

предпочтительно. При железнении можно получить величину слоя покрытия от 0,1 до 1,5 мм исходной твердостью HV 406–495 ед. [59, 142].

В последнее время наибольшее распространение получил способ железнения в горячих хлористых электролитах, температура которых достигает 70...90 °С. Данный процесс хорошо описан в литературе [65, 94, 107, 108, 128]. Вместе с тем процесс восстановления изношенных деталей железнением имеет определенные недостатки, ограничивающих его применение. К ним относятся низкая микротвердость, недостаточная износостойкость получаемых покрытий, что приводит к снижению ресурса восстанавливаемого сопряжения. Рекомендуемые составы электролитов для железнения достаточно полно представлены в литературе [11, 84, 109, 127].

Способ восстановления хромированием, в отличие от железнения, позволяет получать покрытия, которые по многим показателям, в том числе износным, превышает серийный золотник. Для нанесения покрытия использую электролиты, основной компонент которых – хромовый ангидрид. Такие покрытия обладают наиболее высокой твердостью – до HV 1000 [21, 97]. Вместе с тем применение этого способа ограничено ввиду того, что:

- в осаждаемом слое хромового покрытия присутствуют напряжения растяжения, которые будут тем больше, чем больше его толщина, в связи с чем возникает трудность получения качественного слоя покрытия толщиной более 0,05 мм;
- детали, восстановленные хромовым покрытием имеют плохую прирабатываемость, что усложняет процесс селективной сборки с последующей приработкой золотника в корпусе гидрораспределителя;
- процесс хромирования является дорогостоящим из-за высокой стоимости хромового ангидрида и необходимости применения дополнительных очистных сооружений, нейтрализующих хромосодержащие отходы гальванического производства.

Таким образом, процессы железнения и хромирования применительно к восстановлению изношенных деталей достаточно просты и позволяют получать качественные покрытия с необходимыми физико-механическими свойствами, однако их применение ограничено вышеизложенными недостатками.

В случае восстановления золотниковой пары гидрораспределителя P160

особое значение имеет толщина получаемого покрытия из-за значительных износов золотника и корпуса, достигающих 0,2 мм. В связи с этим способ хромирования не может быть применен для решения поставленной задачи, так как получаемая толщина покрытия при этом способе ограничена величиной 0,05–0,06 мм.

В последнее время достаточно широкое распространение получил способ восстановления и упрочнения деталей композиционными электролитическими покрытиями (КЭП) на основе железа [6, 18, 19, 21]. В отличие от классического электролитического железнения, данный способ предусматривает внесение в электролит железнения дисперсных частиц (рисунок 1.9). При модификации классического железнения дисперсными материалами улучшаются физико-механические свойства получаемых покрытий и, главное, в несколько раз увеличиваются их микротвердость, износостойкость, антифрикционные характеристики, термическая и коррозионная стойкость [58, 60, 71, 120, 121, 134, 147]. Вышеизложенное дает основание полагать, что применение данного способа при восстановлении и упрочнении золотников гидрораспределителя Р160 является целесообразным.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наиболее предпочтительными для восстановления золотниковой пары гидрораспределителя Р160 являются: для восстановления отверстий корпуса под золотники – алмазное хонингование; для восстановления и упрочнения поясков золотника – нанесение композиционного электролитического покрытия на основе железа.

1.5 Железнение, модифицированное дисперсными частицами, как способ восстановления золотниковых пар

КЭП – это металлическое покрытие, содержащее включения металлических и неметаллических составляющих, полученное катодным восстановлением металла под действием электрического тока от внешнего источника [6, 17, 120].

Первая работа, посвященная получению КЭП, была опубликована еще в 1929 г. В ней описано образование самосмазываемого медного покрытия из

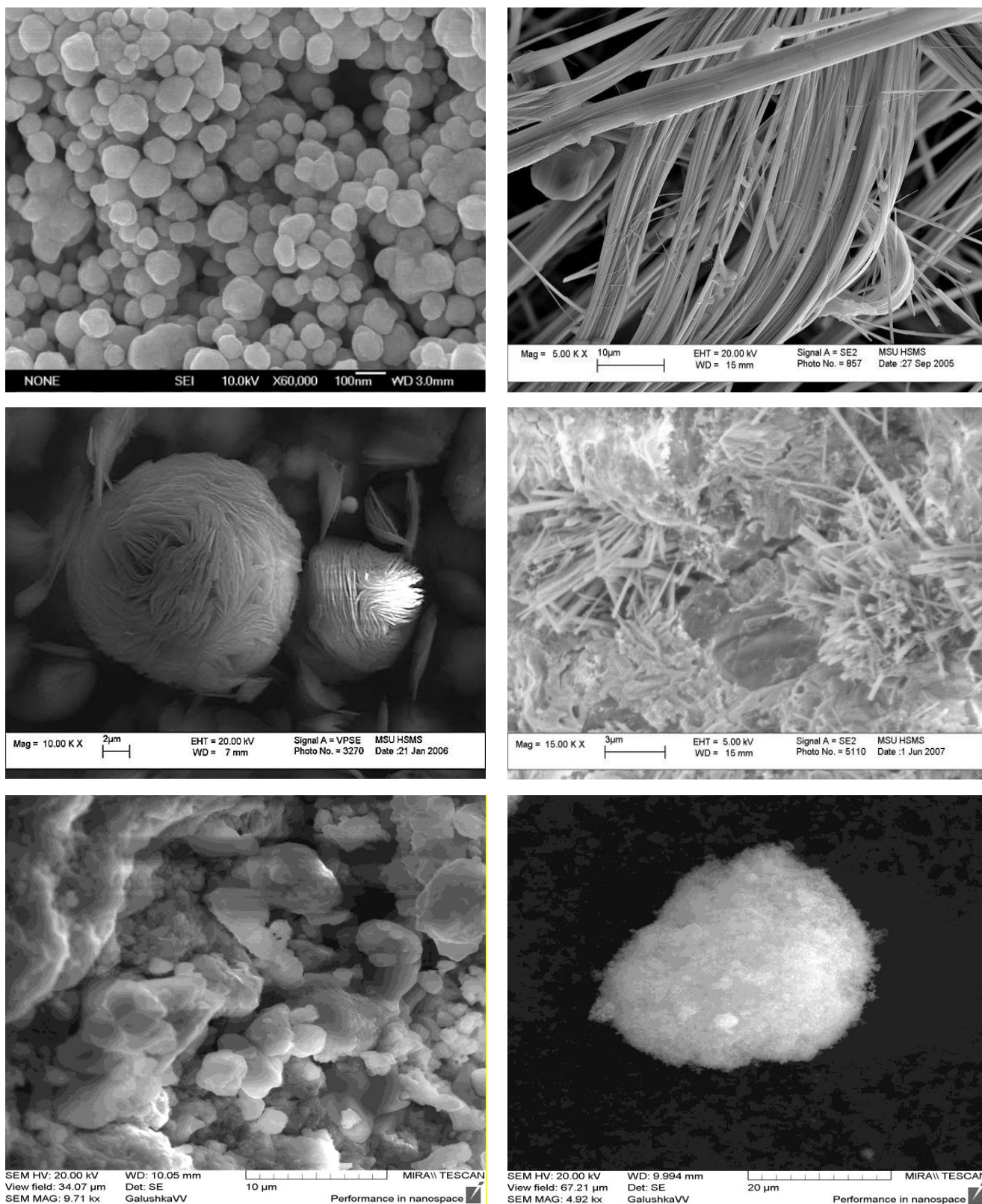


Рисунок 1.9 – Внешний вид частиц для модификации электролитических покрытий

кислого электролита, содержащего коллоидные частицы графита [16]. Образование покрытий с включениями неметаллических примесей из электролитов, содержащих примеси, описано в 1933 г. [96]

Однако только с 1959 г. начались широкие исследования КЭП, проводимые различными крупными промышленными компаниями. Хотя некоторые КЭП были известны и раньше, например, никель-корунд, применяемый для изготовления лестниц подводных лодок, никель-карборунд, используемый для получения зубных боров, никель-алмаз для изготовления абразивных инструментов и т. д. [16].

Включение дисперсных частиц в электролитические покрытия дает возможность улучшить механические и антикоррозионные свойства таких покрытий, не изменяя внешней формы изделий, на которые они наносятся. КЭП совмещают в себе свойства металлов (электро- и теплопроводность, пластичность и др.) и неметаллов (жаропрочность, химическая стойкость, высокая твердость, смазывающие свойства и др.) [120, 121]. Преимущества таких покрытий:

- они образуются непосредственно на поверхности изделия и имеют заданную величину;
- материалы получают компактными, практически беспористыми;
- имеется возможность регулирования физико-механических свойств получаемых покрытий видом и количеством добавляемых дисперсных материалов;
- используются экономичные электролитические методы и приемы.

Эти очень ценные свойства покрытий создают предпосылки для широкого их использования в различных областях промышленности, в том числе в ремонтном производстве.

Важным преимуществом КЭП, по сравнению с твердыми электролитическими покрытиями, является сохранение у них повышенных значений твердости во времени, тогда как обычные покрытия с начальной высокой твердостью теряют твердость уже в первые дни после получения [18].

Износостойкость КЭП в несколько, а иногда и в десятки раз больше, чем износостойкость классических покрытий. Известно, что повышение твердости электролитических покрытий на 10–20 % часто приводит к многократному возрастанию их износостойкости [57]. Так, включение карборунда в серебро, а карбидов титана, вольфрама и хрома – в никель уменьшает износ в десятки раз. Однако увеличение твердости иногда сопровождается повышением хрупкости или

внутренних напряжений покрытий. Чаще всего это происходит при использовании в качестве дисперсной фазы органических добавок [121].

Для различных случаев истирания существует оптимальное значение твердости, при котором наблюдается минимальный износ покрытия. Так, минимальный износ покрытий золотом или его сплавами различных видов электрических контактов наблюдается при одном из следующих значений твердости: 100, 120, 150 или 160 HV в диапазоне от 60 до 300 HV [5]. Для металлургической стали минимальный износ соответствует твердости HV 300. Указанные особенности в определенных пределах могут быть характерными и для КЭП [120].

Нарушение структуры матрицы, вызываемое диспергированием в ней частиц посторонних веществ, может привести к повышению или понижению внутренних напряжений [6]. При изучении внутренних напряжений железных покрытий, полученных из суспензий с частицами MoS_2 , обнаружено, что они уменьшаются с 110 до 60 МПа, а при наличии в электролите Al_2O_3 повышаются с 60 до 240 МПа. Однако при включении Al_2O_3 увеличивается вязкость покрытий и уменьшается окклюзия водорода (наводороживание). При внедрении частиц MoS_2 повышаются хрупкость покрытий и их наводороживание [5].

Методом акустической эмиссии были исследованы внутренние напряжения в КЭП на основе железа, никеля, сплавов Fe-Ni и Fe-Zn, содержащих корунд [17]. Принцип метода заключался в изменении интенсивности упругих волн, возникающих при нагружении образца с покрытием, вызывающих образование микротрещин. Как в КЭП, так и в классических покрытиях возникало одинаковое число упругих волн, однако наличие в матрице дисперсных частиц приводило к нарушению поля напряжений дислокаций и тем самым к ослаблению внутренних напряжений, а также уменьшению хрупкости покрытий [120].

В зависимости от количества дисперсных частиц, внедряющихся в электролитические покрытия, изменяется не только структура последних, но и их наводороживание [19]. Количество включенного в покрытия водорода определяют измерением его объема при извлечении в вакууме и пропорционально содержанию второй

фазы. Высокотемпературный отжиг приводит к максимальному выделению водорода из покрытия, при этом повышается их пластичность и снижается хрупкость.

Обобщенные данные по дисперсным материалам, улучшающим физико-механические свойства покрытий, полученных электролитическим методом, представлены в таблице 1.7.

Для получения КЭП могут быть использованы дисперсные материалы как естественного, так и искусственного происхождения. Свойства основных дисперсных материалов представлены в таблице 1.8.

Одной из главных задач создания композиционных покрытий является улучшение их физико-механических свойств, возможность формирования покрытия с заданными параметрами, которые будут удовлетворять решению поставленной перед исследователем задачи. Для восстановления и упрочнения золотника гидрораспределителя, работающего в жидкой среде с интенсивным гидроабразивным износом, решающую роль играют, прежде всего, толщина получаемого покрытия, его износостойкость и микротвердость [117].

Таблица 1.7 – Дисперсные материалы, влияющие на свойства электролитических покрытий

Свойства покрытия	Дисперсные материалы
Твердость и износостойкость	Al_2O_3 , WC, <u>AlN</u> , ZrO_2 , <u>TiC</u> , <u>SiC</u> , TiO_2 , ZrB_2 , CrB_2 , <u>ZrC</u> , ThO_2 , <u>TaC</u> , <u>HfC</u> , SiO_2 , WSi_2
Износостойкость в условиях сухого трения и повышенных температур	Al_2O_3 , <u>TiB₂</u> , <u>SiC</u> , аморфный углерод
Жаростойкость	Al_2O_3 , <u>SiO₂</u> , <u>TaSi₂</u> , B_4C , <u>ZrO₂</u> , аморфный углерод
Коррозионная стойкость	<u>AlN</u> , ZrB_2 , Al_2O_3 , <u>SiC</u> , <u>HfSi₂</u> , <u>TaSi₂</u>
<u>Антифрикционность</u>	WC, <u>MoS₂</u> , графит
Термостойкость	Оксиды, карбиды
<u>Самосмазывание</u>	Графит, <u>MoS₂</u> , <u>WSi₂</u>
Теплопроводность	<u>AlN</u> , <u>NbSi₂</u> , <u>WSi₂</u>
Эрозионная стойкость	Карбиды
Прочность	Al_2O_3 , <u>AlN</u>

Таблица 1.8 – Свойства дисперсных материалов, применяемых при нанесении КЭП

Материал, химическая формула	Плотность, г/см^3	Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$	Коэф- фициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	Удельная теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$	Тепло-проводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$	Электро- проводность, См/м	Твердость, ГПа
Аморфный углерод	–	3500	5,0...28,0	0,70...1,10	2	$1,5 \cdot 10^4$	–
Графит	2,20	3500	1,0...24,0	0,67	88...360	$(1,6...28,0) \cdot 10^4$	0,5...0,7
HfSi ₂	8,03	1800	8,2	–	16	–	9
WSi ₂	9,25	2160	6,2	0,15	47	$8 \cdot 10^5$	10
NbSi ₂	5,66	2150	10,0	0,15	–	$1,9 \cdot 10^5$	11
MoS ₂	6,10	2100	8,7	0,46	52	$4,6 \cdot 10^5$	12
VC	5,80	2820	6,8	0,67	35	$6 \cdot 10^5$	14
TaSi ₂	8,83	2200	9,2	0,20	–	$2,2 \cdot 10^5$	15
CrB ₂	5,60	2200	10,5	0,45	32	30	16
ZrC	6,80	3540	6,8...7,5	0,42	31	$2 \cdot 10^6$	16
TaC	14,60	3900	4,6...6,6	0,17	23...29	$5 \cdot 10^5$	16
ZrO ₂	5,60	2900	7,0...10,0	0,46	2	$1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3}$	16
HfC	12,70	3880	5,2...6,5	0,21	16	$2,1 \cdot 10^6$	17
ZrB ₂	6,17	3040	5,9	0,54	25	$1 \cdot 10^7$	18
ThO ₂	9,70	3050	9,0...11,0	0,25	11	$2 \cdot 10^{-12}$	7...11
SiO ₂	2,30	1650	7,5...13,7	0,74	10...12	$1 \cdot 10^{-12}$	7...12
TiO ₂	3,80	1870	10,0	0,63	5	300...800	8...19
TiB ₂	4,50	2980	4,6	0,90	25	$6 \cdot 10^6$	19,5
WC	15,80	2770	5,1...7,2	0,17	–	$5 \cdot 10^6$	18...20
TiC	4,90	3140	7,4...9,3	0,42	36	$1,8 \cdot 10^6$	20
SiC	3,21	2150	4,5	1,76	45...150	770	22...24
AlN	3,26	2400	4,0	0,84	29	$1 \cdot 10^{-8}$	25...27
Al ₂ O ₃	3,97	2050	–	0,92	40	$1 \cdot 10^{-14}$	28...30

Существует представление [17, 120], что совместная работа разнородных материалов дает эффект, равносильный созданию нового материала, обладающего

существенно более высокими физико-механическими свойствами. Именно это послужило основанием того, что КЭП, как перспективные покрытия, широко исследуют не только в нашей стране, но и за рубежом – в США, Англии, Японии, Франции, Германии и других странах [135, 152, 155–157, 159, 160].

Высокая износостойкость КЭП на основе железа по сравнению с классическим железнением объясняется гетерогенной структурой композиционного покрытия (принцип Шарпи), в которой сочетаются свойства основы из электролитического железа и частиц дисперсной фазы, обеспечивающие наивыгоднейшие триботехнические характеристики КЭП для различных условий изнашивания (стойкость к схватыванию и др.) и специфический рельеф поверхности трения, способствующий лучшему сохранению смазочной пленки [75].

Повышение износостойкости связывают с тем, что частицы дисперсной фазы, выходя в процессе износа покрытия на поверхность трения, образуют граничные пленки, предотвращающие металлический контакт и разрушение микроучастков поверхности, поддерживая режим граничного трения [85].

Микротвердость как комплексный показатель свойств КЭП имеет несколько иную интерпретацию. Различают микротвердость железа в чистом виде, микротвердость частиц дисперсной фазы и общую микротвердость КЭП на основе железа [54, 115]. Однако в литературе предоставлено мало сведений о теории и механизме повышения микротвердости при включении частиц в электролитическое покрытие.

Из вышеизложенного следует, что существующие методы восстановления золотников гидрораспределителя имеют ряд существенных недостатков, в связи с чем актуальной задачей является разработка нового способа их восстановления и упрочнения, лишенного этих недостатков.

Перспективным способом восстановления и упрочнения золотников гидрораспределителя Р160 является нанесение КЭП на основе железа. При этом достигается необходимая толщина восстанавливаемого слоя (0,25–0,3 мм), появляется возможность регулирования физико-механических свойств в заданных пределах, отсутствует термическое воздействие на деталь, приводящее к ее короблению. Кроме того, для получения таких покрытий не требуются затраты на дорогостоящее оборудование,

так как можно использовать существующее оборудование гальванических цехов, поскольку процесс практически не отличается от классического железнения.

1.6 Выводы по разделу

1. Анализ литературных данных показал, что около 24 % всех отказов по агрегатам и системам сельскохозяйственных тракторов приходится на гидравлическую систему. Было выявлено, что наиболее ответственным звеном этой системы, лимитирующим ее нормальную эксплуатацию, является гидравлический распределитель, на его долю приходится около 32 % отказов.

2. Основным рабочим сопряжением, лимитирующим работу всего гидрораспределителя, является золотниковая пара, износ которой в процессе эксплуатации приводит к увеличению утечек рабочей жидкости через диаметральный зазор между цилиндрическим отверстием в корпусе и поясками золотника.

3. По данным министерства сельского хозяйства Саратовской области в 2018 году в области было зарегистрировано порядка 4000 единиц сельскохозяйственных тракторов оснащённых гидрораспределителями типа Р160, в связи с этим разработка технологии восстановления и упрочнения наиболее ответственных элементов данных гидрораспределителей является актуальной задачей.

4. Анализ видов и степени изнашивания золотниковой пары позволил установить, что преобладающим видом износа сопряжения является гидроабразивный, возникающий при содержании механических примесей в гидравлической жидкости, а суммарный износ в золотниковой паре гидрораспределителя Р160 достигает 0,2 мм.

5. 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 композиционных электролитических покрытий на основе железа. Применение композиционных электролитических покрытий дает возможность исключить недостатки существующих способов восстановления, однако композиционное железнение недостаточно изучено и требует дальнейшего рассмотрения.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ЗОЛОТНИКОВЫХ ПАР ГИДРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ

2.1 Механизм образования композиционных электролитических покрытий

Композиционные электролитические покрытия представляют собой металлические матрицы с заданным распределением в них разнообразных упрочнителей, в качестве которых применяют порошки, волокна и материалы с отличными от матрицы свойствами. Такие покрытия характеризуются границей раздела фаз; по характеру структуры они дисперсно-упрочненные и их можно получать различными способами. КЭП осаждаются из электролита с добавлением дисперсной фазы одного вида (AlN , MoS_2 , Al_2O_3 , TiC , SiC и др.) или нескольких видов одновременно [17].

Различные сочетания материалов матрицы и дисперсной фазы позволяют получить сотни типов КЭП, которые совмещают в себе свойства электролитически осажденных металлов (электро- и теплопроводность, износостойкость, пластичность и др.), а также металлов и неметаллов (жаростойкость, химическая стойкость, твердость и др.), которые могут быть включены в покрытие при наложении поляризующего тока [97]. Это существенно расширяет возможности гальванотехники.

Работы таких ученых, как А.И. Бодневас, И.Н. Бородин, Г.В. Гурьянов, Ю. Е. Кисель, В.Ф. Молчанов, Р.С. Сайфуллин, Р.А. Усманов, В.И. Филатов, И.Г. Хабибулин и многих других являются значительным вкладом в теорию и практику электроосаждения КЭП [16–18, 58–61, 71, 97, 120, 121, 134, 136, 147]. Внимание и поддержку развитию нового направления в технологии оказывали Л.И. Антропов, В.А. Вандышев, Ю.Н. Лебединский, Ю.Ю. Матулис, Ю.Н. Петров [5, 6, 21, 85, 86, 92, 108, 109, 113]. Результаты экспериментальных исследований предопределили использование КЭП в различных сферах, в том числе в ремонтном производстве. Такие покрытия стали использовать для восстановления изношенных поверхностей, защиты деталей от коррозии, изготовления и упрочнения режущего инструмента, упрочнения штампов и измерительного инструмента и др. В США, Англии, Японии, Германии и других странах также широко внедряют КЭП в производство деталей машин [135, 152, 155–157, 159, 160].

Разработкой теории и практики получения КЭП занимались Р.С. Сайфуллин с сотрудниками [120, 121], которые изучали влияние твердых частиц на электролитическое осаждение никеля, меди, железа, серебра, цинка, свинца, золота и других металлов. В результате этих исследований была доказана полная технико-экономическая целесообразность внедрения в практику покрытий из электролитов-суспензий, а также дано математическое описание ряда закономерностей получения КЭП из этих электролитов.

Всесторонние исследования композиционных покрытий на основе электролитического железа с включением Al_2O_3 , MoS_2 , B_4C , W_2B_5 , TiC и других частиц были проведены Ю.Н. Петровым, Г.В. Гурьяновым и другими авторами [58-61, 108, 109]. Ими установлено, что при повышении концентрации Al_2O_3 и MoS_2 снижается образование трещин в покрытиях, увеличивается пластичность, уменьшается степень совершенства текстуры, а так же изменения других свойств. Введение в электролит железнения карбида бора способствовало уменьшению наводороживания покрытия в 1,4–1,6 раза, а введение дисульфида молибдена уменьшало этот показатель в 1,2–2,4 раза. Установлено, что наличие включений в электролитических покрытиях железа не оказывает влияния на усталостную прочность железненных образцов. Износостойкость композиционных железных покрытий с включениями в 1,5–2,0 раза выше износостойкости чистого железа [97].

Электролиты для получения КЭП готовят путем добавления порошков второй фазы в количествах от 0,1 до 10 %. Включение дисперсных частиц вызывает изменение структуры электролита, что приводит к изменению ряда его технологических особенностей – выхода металла по току, рассеивающей способности, а также физико-механических свойств получаемых покрытий. Это объясняется тем, что изменяются электропроводность электролита и поляризация при добавке в него дисперсных частиц [6].

В образовании КЭП Р.С. Сайфуллин [120] вывел закономерность: встреча частиц с поверхностью катода, их задержание на поверхности и зарастание.

Встреча дисперсных частиц с поверхностью катода осуществляется перемешиванием электролита естественным или искусственным путем. Естествен-

ное перемешивание возникает в связи с броуновским движением несоразмерных частиц в электролите, их электростатическим переносом, седиментацией и миграцией. Искусственное перемешивание может быть осуществлено пропеллерной мешалкой, газом или воздухом, ультразвуком, применением вращающихся анодов и др. [128]. При этом наиболее перспективным является применение ультразвука.

Ультразвуковые колебания обеспечивают сверхтонкое диспергирование, которое не реализуется другими способами, увеличивая межфазную поверхность реагирующих элементов [56]. Возникающая под действием ультразвуковых колебаний в жидкости кавитация и сопровождающие ее мощнейшие микропотоки, звуковое давление и «звуковой ветер» способствуют снижению сопротивления переносу частиц в жидкости и интенсификации процесса подвода частиц к катоду [77].

Задержание частиц на поверхности катода происходит за счет таких малоизученных явлений, как адгезия, адсорбция, налипание, встреча частиц с центрами кристаллизации покрытия, формирующимися блоками, зародышами и другими структурными образованиями в покрытии [5, 6]. Однако задержанию частиц второй фазы на поверхности катода препятствуют их столкновения между собой. Способствуют соударению частиц противоположность их заряда, движение электролита, седиментация и прочие явления. Это может привести к выламыванию частиц с поверхности катода, вследствие чего построение логической и математической модели образования КЭП затруднено. Наличие дефектов структуры электролитических покрытий, таких, как поры, трещины, капилляры, микро- и макронеровности также препятствует удержанию размерных частиц на поверхности катода [16].

Следовательно, на удержание частиц на поверхности катода с одной стороны влияют свойства самих частиц, с другой – совокупность свойств металла катода, свойства и состав электролита и режимы электролиза.

Дисперсные частицы оказывают влияние на их зарастание, искажая электрические и диффузионные поля, экранируя части поверхности катода, изменяя фактическую площадь катода и тем самым плотность катодного тока. Все это, в свою очередь, влияет на адсорбцию частиц и молекул, пассивацию и характер формирования, а также рост покрытия [18].

Стоит отметить влияние частиц, движущихся с упругими соударениями с катодом или скользящих по его поверхности. Это влияние проявляется, прежде всего, в активировании поверхности катода удалением с нее адсорбированных пузырьков газа, гидроксидов и сглаживании поверхности. Результаты ряда работ по этому вопросу обобщили авторы [17, 120]. Они доказали, что твердые частицы, механически воздействуя на катод, способствуют увеличению плотности катодного тока, смещению потенциала электрода, снижению катодной пассивации. Твердость дисперсной фазы и ее доля в электролите определяют изменение поляризации катода. Движущиеся частицы препятствуют образованию дендритов, питтингов и пор, вызываемых накоплением и ростом пузырьков водорода. Ряд исследователей [18, 19, 59, 134] отмечают эти закономерности при осаждении железа, а также никеля и других металлов.

Присутствие в электролите дисперсной фазы делает ее участником процесса электрокристаллизации. Находясь на расстоянии от катода, соизмеримом с диаметром частицы, она экранирует часть его поверхности [121]. Наиболее вероятно расположение дисперсной частицы в непосредственной близости у катода или ее миграция к центрам кристаллизации по поверхности катода. Экранирование изменяет условия образования растущего покрытия [134]. Если частица достаточно долго находится в непосредственной близости от катода, то это приводит к образованию некоторого углубления на его поверхности (рисунок 2.1, *а*), в которую она постепенно опускается и в дальнейшем зарастает покрытием (рисунок 2.1, *б*) [17].

Возможность непосредственного контакта частиц с катодом в процессе электрокристаллизации металла зависит от большинства факторов, таких как свойства дисперсной фазы, ее адгезия, а также от зарядов частиц и заряда катода. Если толщина адсорбционных слоев дисперсной частицы и катода меньше некоторого критического расстояния (одно из условий образования композиционного покрытия), то возможность непосредственного контакта дисперсной фазы с катодом значительно возрастает [18]. При этом образуются прослойки жидкости, прочно удерживающие частицы у поверхности катода. Их контакту с катодом

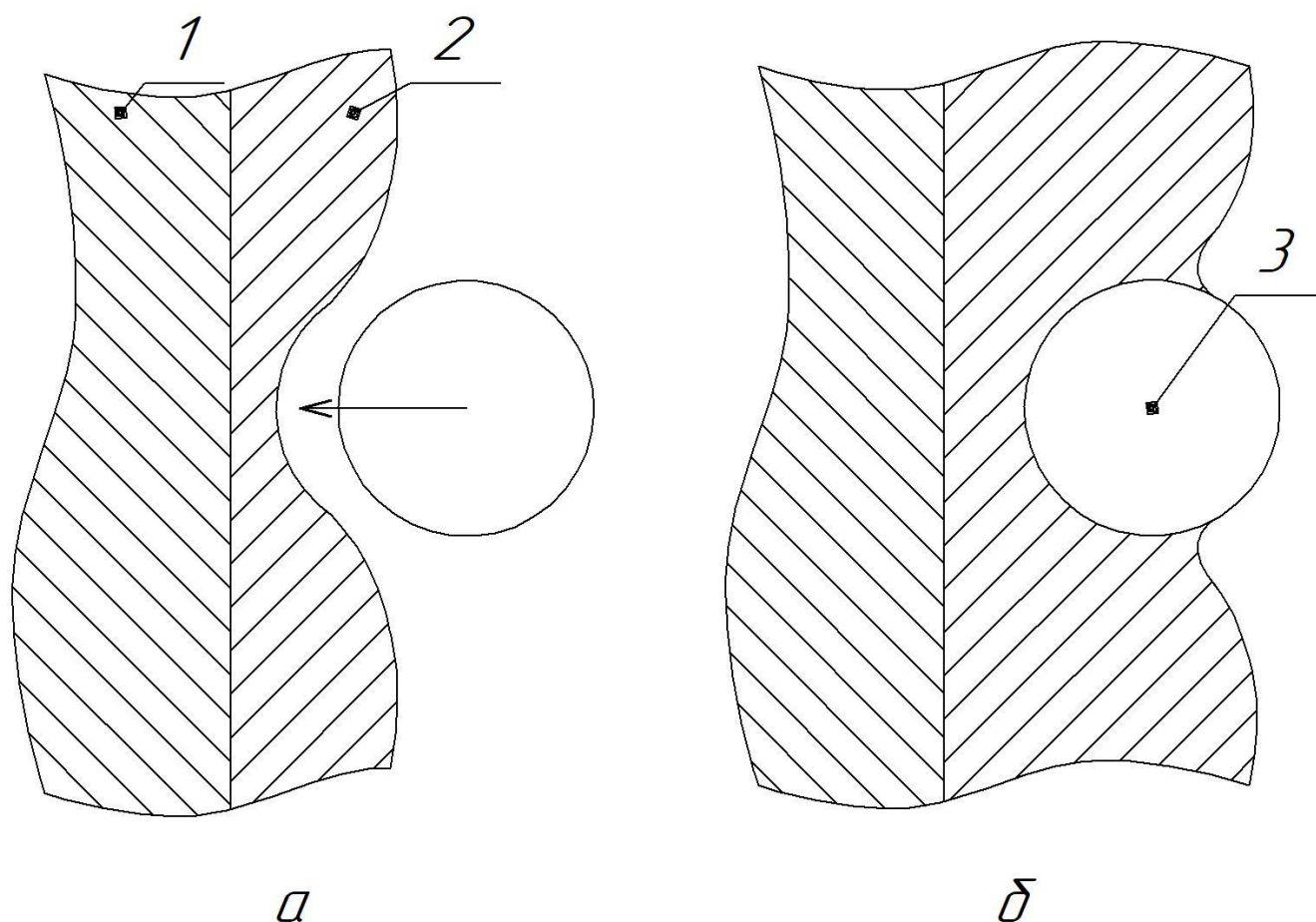


Рисунок 2.1 – Экранирование наноразмерной частицей покрытия:
а – образование углубления; *б* – зарастание наночастицы в углублении;
 1 – деталь; 2 – покрытие; 3 – наноразмерная частица

способствует также образование кислородных и гидроксидных соединений металлов в процессе электролиза. Такие соединения являются промежуточными продуктами электрохимических реакций и посредниками в механизме превращения гидратированного иона в атом и ион кристаллической решетки [21]. Гидроксидные соединения гидрофильны, имеют положительный заряд и хорошо удерживают у катода отрицательно заряженные дисперсные частицы.

Положительное влияние промежуточных продуктов электрохимической реакции усиливается, если в области электродных потенциалов соответствующих рабочей плотности катодного тока заряд катода отрицателен [19].

Частицы дисперсной фазы хорошо зарастают покрытием при адгезии к катоду. Электропроводные частицы способны зарастать как с основания, так и с вершины, увеличивая при этом шероховатость поверхности катода.

Неэлектропроводные частицы зарастают с основания; покрытия получаются беспористые, плотные, обычно без питтинга и дендритов, незначительно влияя на шероховатость покрытия (рисунок 2.2) [18].

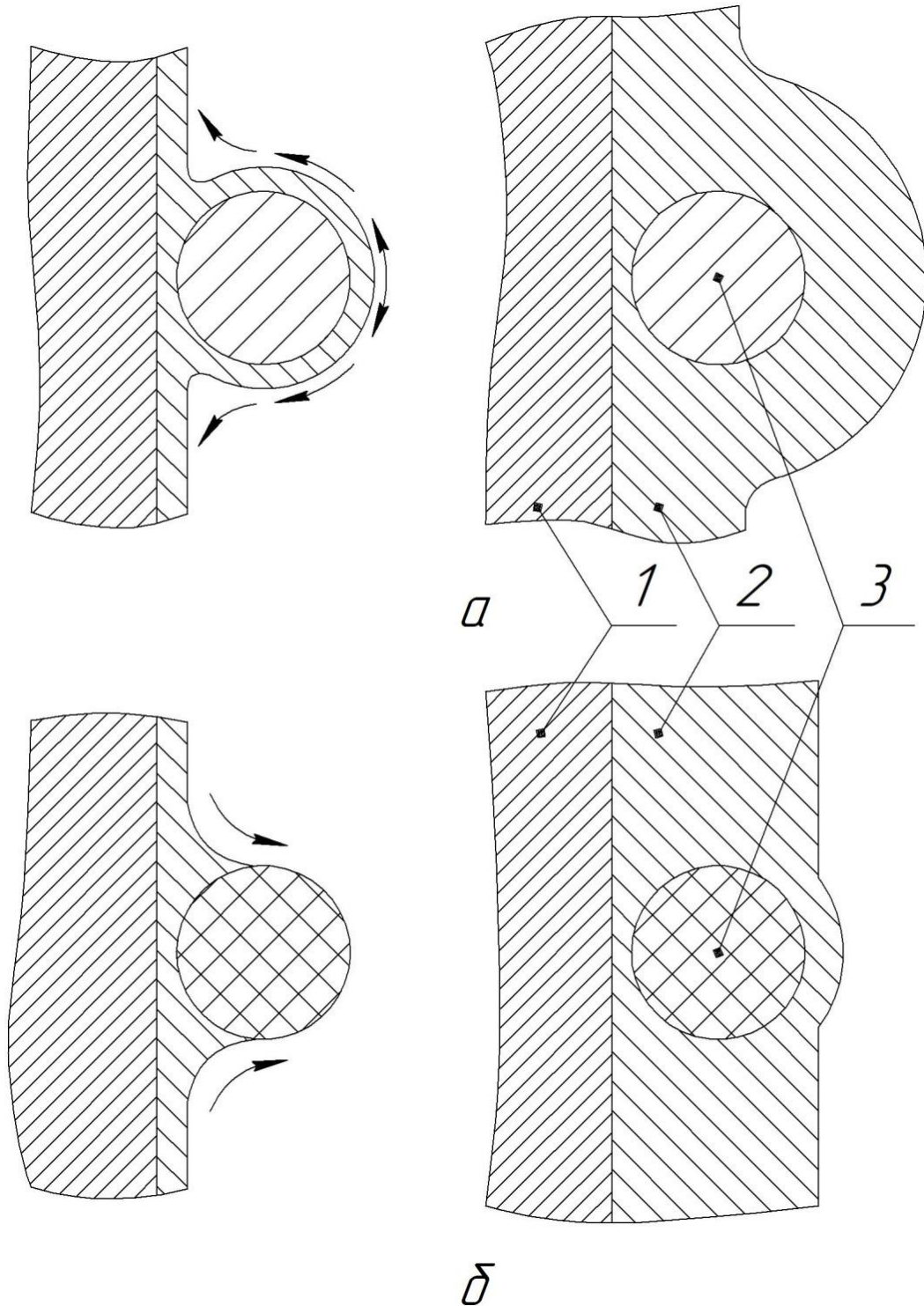


Рисунок 2.2 – Схема зарастания наноразмерных частиц:
а – токопроводящих; *б* – диэлектрических; 1 – деталь,
 2 – покрытие, 3 – наноразмерная частица

Таким образом, для образования КЭП желателен непосредственный контакт частицы с катодом. Однако образование КЭП вполне возможно при наличии жидкой прослойки толщиной меньше некоторого критического расстояния. При этом наиболее предпочтительными являются неэлектропроводные частицы, так как они практически не изменяют шероховатость получаемых покрытий.

Включенные в покрытие дисперсные частицы изменяют структуру и физико-механические свойства покрытия [85].

Характерный признак электролита для получения КЭП – неравновесное состояние. Одни электролиты довольно быстро достигают состояния равновесия и для получения КЭП не используются. Для них требуется приложение энергии для поддержания частиц во взвешенном состоянии. Другие электролиты медленно переходят в состояние равновесия и более пригодны для получения КЭП. Кинетическая устойчивость электролитов зависит от многих факторов, таких, как плотность и температура, размер и свойства дисперсной фазы, ее концентрация [17].

Электролит всегда стремится к равновесному состоянию, при котором площадь межфазной поверхности минимальна [120]. Равновесия быстрее достигают те электролиты, у которых размеры частиц дисперсной фазы больше. С уменьшением размера частиц система приобретает наибольшую кинетическую устойчивость, так как площадь межфазной поверхности увеличивается. Такое состояние наиболее характерно для коллоидных электролитов.

Большинство ученых [18, 19, 21, 121] в проведенных исследованиях показывают, что для получения КЭП из суспензий с размерами частиц 0,01...0,02 мм необходимо постоянное направленное перемещение частиц к катоду. Однако если размер частиц в суспензии до 0,001 мм, достаточно предварительного перемешивания суспензии перед осаждением покрытия.

Многие авторы в своих работах [17, 85, 97, 112, 113, 120] полагают, что частицы с размерами более 10^{-4} мм сложнее внедряются в покрытие, легче седиментируют и уходят в осадок, в связи с чем их рецептурная концентрация всегда выше активной, тогда как предпочтительные размеры дисперсной фазы для поддержания

кинетической устойчивости суспензий и эффективного включения в осаждаемое покрытие должны иметь нанометровый диапазон и составлять от 10^{-5} до 10^{-4} мм.

Покрyтия, полученные с частицами нанометрового диапазона, мало изучены и представляют большой научно-практический интерес. В связи с этим исследование влияния наноразмерных частиц на электролитические покрытия является актуальной задачей.

2.2 Теоретическое обоснование повышения ресурса золотниковой пары гидрораспределителя

Исследования, проведенные учеными А.А. Старосельским и Д.Н. Гаркуновым, позволили установить зависимость ресурса сопряжения от скорости изнашивания по следующей зависимости [129]:

$$T_{з.п.} = \frac{I_n - I_{п}}{I_v}, \quad (2.1)$$

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

При определении ресурса нового или восстановленного сопряжения величиной I_n можно пренебречь. Тогда формула (2.1) примет следующий вид:

$$T_{з.п.} = \frac{I_{п}}{I_v}. \quad (2.2)$$

Скорость изнашивания можно представить через ее интенсивность по следующей зависимости [75]:

$$I_v = I_h v_{тр}, \quad (2.3)$$

где $v_{тр}$ – скорость относительного перемещения поверхностей трения.

Тогда ресурс сопряжения:

$$T_{з.п.} = \frac{I_{п}}{I_h v_{тр}}. \quad (2.4)$$

Как уже было отмечено в первой главе, преобладающий вид изнашивания золотниковой пары – гидроабразивный, в результате которого основное негативное воздействие на сопряжение оказывает микрорезание его поверхностей твердыми абразивными частицами [80].

Микрорезание происходит вследствие того, что даже при небольших внешних нагрузках твердая абразивная частица внедряется в поверхности деталей сопряжения и продвигается по линии действия силы трения. Каждое продвижение приводит к царапанию поверхности, вследствие которого срезается ее небольшая часть [79]. Следовательно, чем больше произойдет царапаний поверхности, тем больше металла срежется. При этом наибольшую величину износа будут обеспечивать абразивные частицы, имеющие вершины в форме треугольной пирамиды (рисунок 2.3) [81].

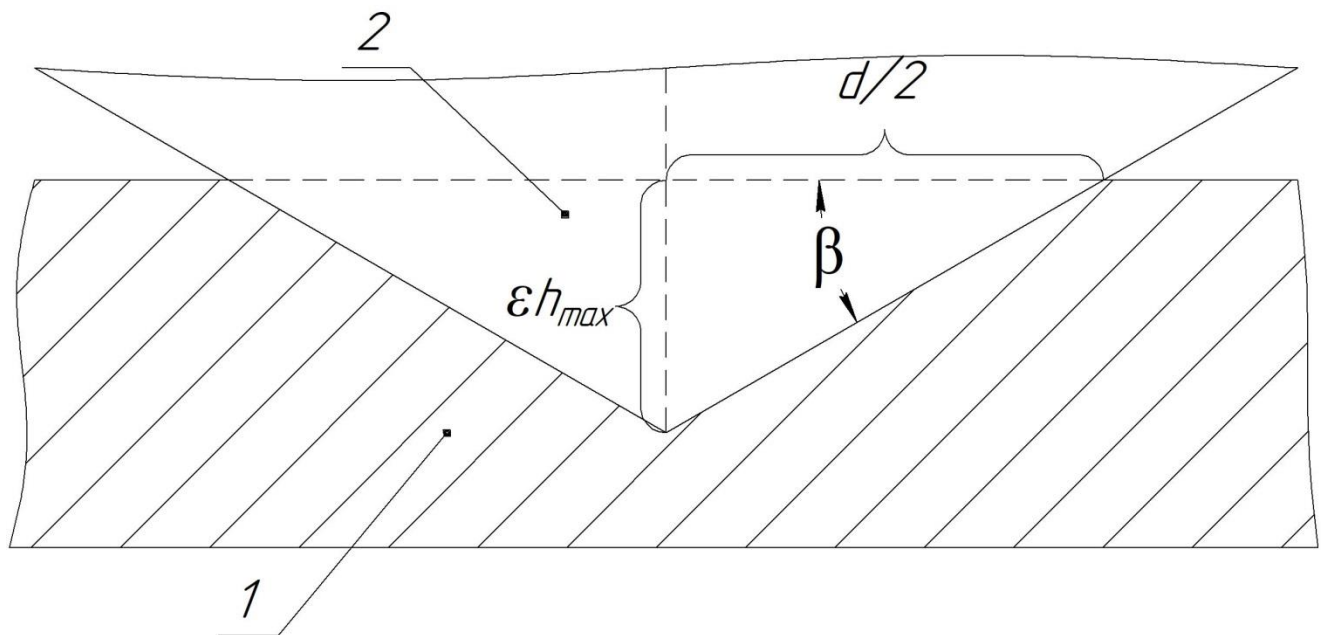


Рисунок 2.3 – Профиль модели неровности: 1 – деталь; 2 – абразивная частица; $\varepsilon h_{\max}$ – величина внедрения абразивной частицы в поверхность детали, мм; β – угол внедрения абразивной частицы в поверхность детали, град.; d – диаметр абразивной частицы, мм

Из рисунка 2.3, с некоторым приближением можно предположить [80]:

$$\frac{\varepsilon h_{\max}}{d} = \frac{\operatorname{tg} \beta}{2}, \quad (2.5)$$

где ε – относительная износостойкость; $h_{\max}$ – максимальная глубина внедрения абразивной частицы в поверхность детали, мм.

Известно [81], что интенсивность изнашивания детали сопряжения определяется по зависимости:

$$I_h = \frac{0,15}{n} \sqrt{\frac{h}{r}} \frac{q_a}{HV}, \quad (2.6)$$

где n – количество воздействий, приводящих к отделению металла; h – глубина снятого при микрорезании слоя металла, мм; r – радиус абразивной частицы, мм; q_a – номинальное удельное давление, Па; HV – микротвердость детали.

Согласно И.В. Крагельскому [79–81] можно сделать допущение, что при микрорезании $n = 1$. Тогда с учетом (2.6) получим:

$$I_h = \frac{\operatorname{tg} \beta}{2(\nu + 1)} \frac{q_a}{HV}, \quad (2.7)$$

где $\nu + 1$ – число циклов, приводящих к отделению частицы износа.

Интенсивность изнашивания золотниковой пары [109]:

$$I_h^{3.п.} = I_h^3 + I_h^K, \quad (2.8)$$

где I_h^3 и I_h^K – интенсивность изнашивания золотника и корпуса соответственно.

Подставляя полученное выражение (2.7) в формулу (2.4), имеем:

$$T_{3.п.} = \frac{2(\nu + 1)I_{\Pi}(HV_3 + HV_K)}{\operatorname{tg} \beta q_a v_{\text{тр}}}. \quad (2.9)$$

Анализируя полученное уравнение 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.

2.3 Математическая модель повышения микротвердости нанокомпозиционных электролитических покрытий

При исследовании КЭП многими авторами [6, 21, 61, 85, 97, 142] было установлено изменение их физико-механических свойств при включении дисперсных частиц. При этом если вносимые частицы по твердости были выше электролитических покрытий, то последние упрочнялись. «Твердость КПП определяется главным

образом искажениями кристаллической решетки металла под действием водорода и дисперсных частиц. Наибольшую твердость имеют КГП с явно выраженными дефектами кристаллической решетки...» [17, с. 143]. (В цитате *КГП - Композиционного гальванического покрытия*). Однако повышение микротвердости КЭП не зависит прямо пропорционально от твердости вносимых частиц, поэтому механизм упрочнения композиционных покрытий требует изучения.

Многие исследователи, такие как Л.И. Антропов, И.Н. Бородин, Ю.Н. Лебединский, М.П. Мелков, В.Ф. Молчанов, Р.С. Сайфуллин [5, 18, 86, 94, 97, 120] в своих работах указывали, что основной теоретической базой для объяснения механизма упрочнения электролитических покрытий включением твердых частиц служит теория дислокаций и препятствий.

По мнению В.Ф. Молчанова [97] упрочнение КЭП является следствием точечных дефектов и несовершенств покрытий, что вызывает возникновение обратимых микропластических деформаций. «...Таким образом, возникновением около мелкодисперсных частиц обратимых микропластических деформаций, вызывающих упрочнение осадка, можно объяснить резкое улучшение физико-механических свойств ККЭП» [97, с. 42]. (В цитате *ККЭП - комбинированные композиционные электролитические покрытия*).

Основными дефектами кристаллического строения могут являться точечные дефекты и дислокационные явления. При этом точечные дефекты вызывают нарушения кристаллической решетки только в окрестностях одного или нескольких соседних узлов. Большую роль в этом процессе играют дефекты дислокационного типа [17].

«Чем больше инородных включений в электроосажденном металле, тем больше плотность дислокаций. Механические напряжения вызывают движения дислокаций в кристалле, которое сопровождается генерацией точечных дефектов. Перемещение дислокаций продолжается до тех пор, пока оно не затормозится при взаимодействии с примесными атомами, а так же с другими дислокациями. В ходе пластической деформации плотность дислокаций возрастает. Чем больше плотность дислокаций, тем большее затруднение они встречают при перемещении скольжением. При перемещении дислокаций происходит образование дислокационных петель около точечных дефектов в кристаллических решетках и инородных

включений. Дислокационная петля, закрепленная в двух точках на поверхности кристалла, под действием напряжений может, в свою очередь, генерировать другие дислокационные петли, которые пронизывают кристалл.

При перемещении дислокации в случае встречи их с частицами они могут огибать эти препятствия, оставляя замкнутые петли. Увеличение частиц в осадке, уменьшение расстояния между ними вызывают увеличение сопротивления перемещению, так как увеличивается количество барьеров, которые должны преодолеть дислокации. Это вызывает увеличение числа образующихся дислокационных петель. Накопление дислокационных петель вокруг твердых включений создает дополнительное активное напряжение и упрочнение матрицы» [97, с. 43].

Описанные процессы влияния дислокационных явлений и точечных дефектов на упрочнение КЭП – важная, но не единственная причина упрочнения покрытия. Исследования, проведенные авторами [6, 18, 21, 86, 121], показали, что дисперсные частицы способствуют уменьшению размеров зерна покрытия, благодаря чему происходит уплотнение матрицы и как следствие – повышение микротвердости всей композиции. «КЭП отличаются по свойствам от чистых покрытий, так как в процессе их получения изменяется структура матрицы (измельчение зерна). Измельчение зерна происходит вследствие внедрения частиц в матрицу, а так же в результате механического воздействия этих частиц на поверхность матрицы в процессе осаждения. Кроме того, сами частицы изменяют свойства КЭП» [120, с. 106]. Упрочняющий эффект от измельчения зерна распространяется на все покрытие. Так как дисперсные частицы являются центрами кристаллизации электролитического покрытия, то зерна, расположенные вблизи наночастиц, будут иметь наименьший размер [17, 29, 113].

Вышеизложенные исследования авторов [5, 18, 21, 29, 86, 94, 97, 113, 120] дают основание предположить, 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 теоретическую модель происходящих процессов с математической точки зрения (рисунок 2.4) [133].

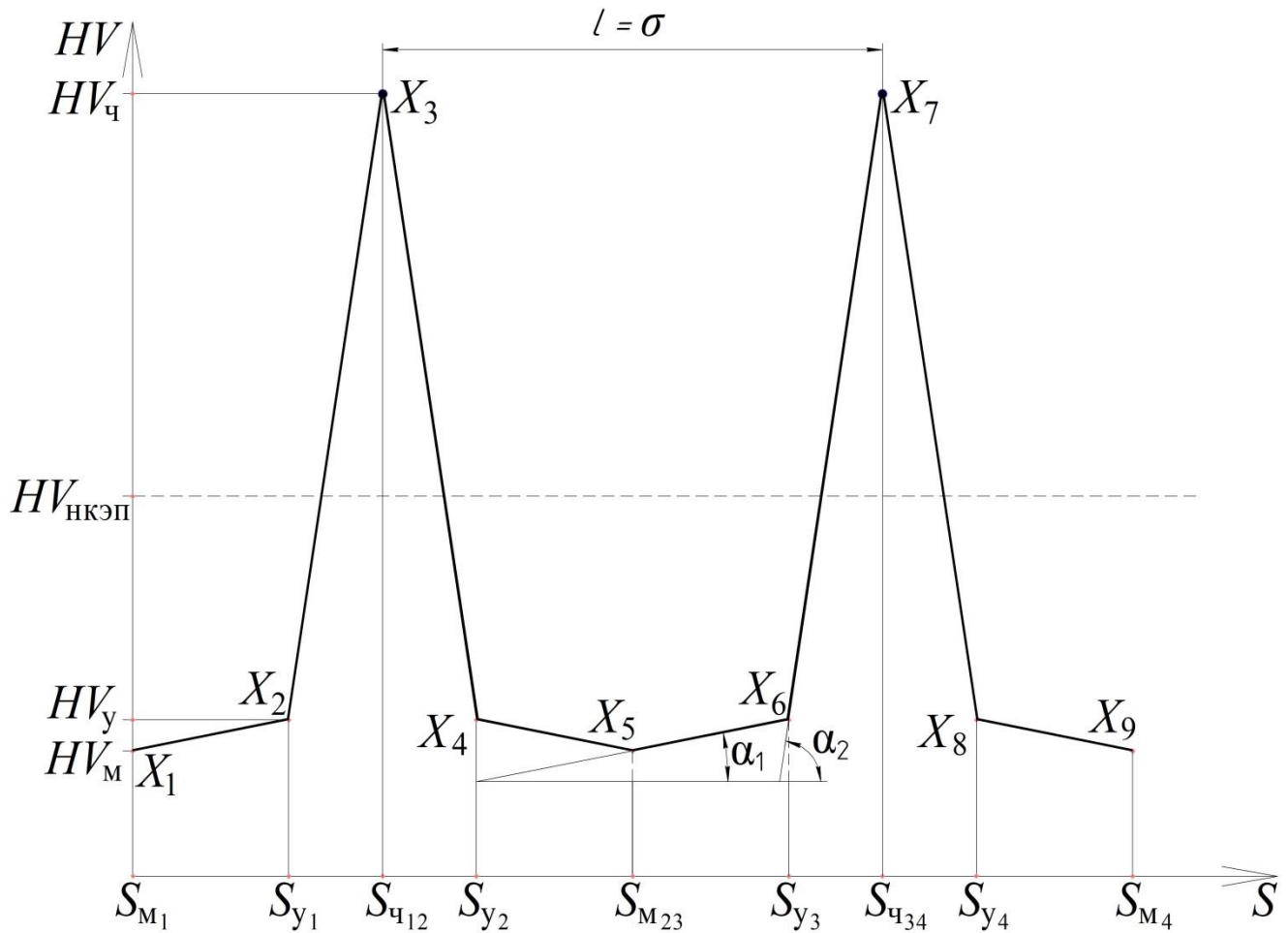


Рисунок 2.4 – Схема построения математической модели механизма упрочнения НКЭП: HV – микротвердость покрытия; HV_q – микротвердость наноразмерных частиц; $HV_{НКЭП}$ – теоретическая микротвердость НКЭП; HV_y – микротвердость НКЭП от влияния дислокационных явлений и точечных дефектов, а так же уменьшения размеров его зерна; HV_M – микротвердость электролитического покрытия без наноразмерных частиц; S – расстояния между элементами покрытия; $S_{M_1} \dots S_{M_4}$, $S_{y_1} \dots S_{y_4}$, $S_{q_{12}} \dots S_{q_{34}}$ – координаты на оси S соответствующих величин HV_M , HV_y и HV_q ; 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.

Так как представленную модель рассматривали в виде системы последовательных независимых линейных процессов, то логично говорить о линейности системы в целом. Результирующий эффект линейных процессов можно получить при изучении отдельных этапов их графического представления.

На основании модели установлена функциональная зависимость микротвердости НКЭП от расстояния между наноразмерными частицами [133]:

$$HV = f(S). \quad (2.10)$$

Из представленной схемы видно, что расстояние между наноразмерными частицами можно определить следующим образом:

$$l = \sigma = S_{q_{34}} - S_{q_{12}}, \quad (2.11)$$

Таким образом, все процессы, проходящие на интервале $[S_{m_1}; S_{m_{23}}]$, повторяются с периодом σ , аналогично интервалу $[S_{q_{12}}; S_{q_{34}}]$. В связи с этим дальнейшее исследование математической модели будем проводить на интервале $[S_{m_1}; S_{m_{23}}]$.

Исследование свойств функции (2.10) позволяет с математической точки зрения описать механизм упрочнения НКЭП.

Исходная формула для аналитического представления математической модели механизма упрочнения НКЭП является (см. рисунок 2.4) [62]:

$$X_i X_j: \frac{HV - HV_i}{HV_j - HV_i} = \frac{S - S_i}{S_j - S_i}, \quad i \neq j, \quad (2.12)$$

где $X_i X_j$ – прямая, проходящая через точки X_i и X_j ; HV_i , HV_j , S_i , S_j – произвольные координаты точек на соответствующих прямых.

Подставляя координаты известных точек X_1 , X_2 , X_3 , X_4 и X_5 в формулу (2.12), получим систему уравнений:

$$\begin{aligned}
X_1X_2: HV &= \operatorname{tg} \alpha_1 S + b_1, S \in [S_{M_1}; S_{Y_1}]; \\
X_2X_3: HV &= \operatorname{tg} \alpha_2 S + b_2, S \in [S_{Y_1}; S_{\chi_{12}}]; \\
X_3X_4: HV &= -\operatorname{tg} \alpha_1 S + b_3, S \in [S_{\chi_{12}}; S_{Y_2}]; \\
X_4X_5: HV &= -\operatorname{tg} \alpha_2 S + b_4, S \in [S_{Y_2}; S_{M_{23}}],
\end{aligned} \tag{2.13}$$

где b_1, b_2, b_3, b_4 – коэффициенты смещения прямой по оси HV .

Так как модель на интервале $[S_{M_1}; S_{M_{23}}]$ симметрична относительно прямой $S = S_{\chi_{12}}$, то тангенсы углов наклона α_1 и α_2 прямых X_1X_2 и X_2X_3 к оси S равны по модулю, но противоположны по знаку тангенсам углов наклона α_1 и α_2 прямых X_3X_4 и X_4X_5 к оси S .

Рассмотрим график функции (2.10), уточненной системой уравнений (2.13), в выбранном интервале $[S_{M_1}; S_{M_{23}}]$:

- 1) функция имеет область определения – интервал $[S_{M_1}; S_{M_{23}}]$;
- 2) интервал $[HV_M; HV_{\chi}]$ – это область значений функции;
- 3) функция возрастает $\forall S$, если $S \in [S_{M_1}; S_{\chi_{12}}]$;
- 4) функция убывает $\forall S$, если $S \in [S_{\chi_{12}}; S_{M_{23}}]$;
- 5) функция сверху и снизу ограничена известными величинами HV_M и HV_{χ} в области определения;
- 6) функция достигает максимального значения в точке с координатами $(HV_{\chi}; S_{\chi_{12}})$ рассматриваемого интервала;
- 7) прямая $S = S_{\chi_{12}}$ является осью симметрии графика функции в рассматриваемом интервале.

Для нахождения теоретической микротвердости покрытия $HV_{\text{НКЭП}}$ использованы элементы интегрального исчисления [90]. В общем виде микротвердость НКЭП будет определяться как:

$$HV_{\text{НКЭП}} = \frac{\int_{S_{M_1}}^{S_{M_{23}}} HV(S) dS}{l}. \tag{2.14}$$

Для упрощения задачи определения теоретической микротвердости НКЭП необходимо и достаточно найти ее значения по минимальной площади, тогда

функцию (2.10) можно рассмотреть только в интервале $[S_{m1}; S_{q12}]$. Здесь прямые X_1X_2 и X_2X_3 описываются соответствующими уравнениями системы (2.13):

$$HV_{\text{НКЭП}} = \frac{2(\int_{S_{m1}}^{S_{y1}} (\text{tg } \alpha_1 S + b_1) dS + \int_{S_{y1}}^{S_{q12}} (\text{tg } \alpha_2 S + b_2) dS)}{l}. \quad (2.15)$$

Как известно [120, 121], расстояние между частицами в НКЭП можно найти по зависимости:

$$l = 3,74 d a_v^{-1/3}, \quad (2.16)$$

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

$$a_v = \frac{100 C_3}{\rho_ч} \quad (2.17)$$

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

С учетом формул (2.16) и (2.17) зависимость микротвердости НКЭП от концентрации в нем наноразмерных частиц:

$$HV_{\text{НКЭП}} = \frac{2(\int_{S_{m1}}^{S_{y1}} (\text{tg } \alpha_1 S + b_1) dS + \int_{S_{y1}}^{S_{q12}} (\text{tg } \alpha_2 S + b_2) dS)}{3,74 d \left(\frac{100 C_3}{\rho_ч} \right)^{-1/3}}. \quad (2.18)$$

Подставив полученную зависимость (2.18) в формулу (2.9), 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.

2.4 Применение метода математического планирования эксперимента для определения наиболее эффективных режимов нанесения покрытия и концентрации наноразмерных частиц

Для определения необходимых режимов нанесения покрытия и концентрации НКЭП выбирали параметр оптимизации и факторы влияния на параметр.

В качестве параметра оптимизации U была принята микротвердость НКЭП, так как она в значительной мере влияет на ресурс золотниковой пары.

В качестве факторов, оказывающих наибольшее влияние на параметр оптимизации, были выбраны: x_1 – концентрация наноразмерных частиц нитрида алюминия (AlN), г/л; x_2 – температура электролита железнения, °C; x_3 – плотность катодного тока при нанесении покрытий, А/дм².

Планирование подразумевает использование полиномов. Для трехфакторного эксперимента достаточно полинома второго порядка. В качестве математической модели исследуемого процесса можно использовать уравнение регрессии вида [3]:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^k b_{jr} x_j x_r + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2; \quad (j \neq r), \quad (2.19)$$

где k – число факторов; b – коэффициенты уравнения множественной регрессии; j – номер фактора; x – независимые переменные.

План эксперимента, необходимый для установления режимов и состава электролита железнения, выбирали исходя из вида модели. Для определения коэффициентов квадратичной модели использовали составной план эксперимента, включающий в себя нескольких блоков:

- полная реплика симметричного двухуровневого плана;
- точки в центре плана, расположенные в начале координат факторного пространства;
- звездные точки.

Звездной является точка факторного пространства, в которой все факторы равны нулю, за исключением одного, принимающего значения $\pm\alpha$, где α – звездное плечо. Тогда, число опытов составного плана будет определяться зависимостью [3]:

$$N = N_{\text{п}} + 2n + N_{\text{ц}}; \quad (2.20)$$

где $N_{\text{п}}$ – число опытов полной реплики; $N_{\text{ц}}$ – число опытов в центре плана с координатами $(0, 0, \dots, 0)$; n – количество факторов; $2n$ – число опытов в звездных точках, имеющих координаты:

$$\begin{vmatrix} \pm\alpha, & 0, & 0, & \dots, & 0 \\ 0, & \pm\alpha, & 0, & \dots, & 0 \\ \dots, & \dots, & \dots, & \dots, & \dots \\ 0, & 0, & 0, & \dots, & \pm\alpha \end{vmatrix}$$

Для выбранного плана звездное плечо составляет $\alpha = 2^{n/4}$ [55]. Постоянство дисперсии расчетных значений функции отклика внутри области варьирования в ротатабельном композиционном плане обеспечивает число опытов в центральной точке $N_{\text{ц}} = 2^n$.

Для удобства расчетов и анализа результатов переходим к нормированному масштабу факторов. Для i -го фактора [122]:

$$X_i = \frac{x_i + x_{i_0}}{\Delta x_i}, \quad (2.21)$$

где x_i – нормированное значение i -го фактора; x_{i_0} – натуральное значение i -го фактора; Δx_i – интервал варьирования i -го фактора:

$$\Delta x_i = |x_i - x_{i_0}|. \quad (2.22)$$

В результате нормирования значение верхнего уровня фактора $x_{\text{ив}} = +1$; значение нижнего уровня фактора $x_{\text{ин}} = -1$.

В соответствии с выражением (2.19) для описания исследуемого процесса использовали модель второго порядка вида:

$$y' = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_1 X_1^2 + b_2 X_2^2 + b_3 X_3^2. \quad (2.23)$$

При ротатабельном композиционном планировании для вычисления оценок коэффициентов регрессии и соответствующих оценок дисперсий находим следующие константы [3]:

$$A = \frac{1}{2B[(n+2)B - n]}, \quad (2.24)$$

$$B = \frac{nN}{(n+2)(N - N_{\text{ц}})}, \quad (2.25)$$

$$C = \frac{N}{N - N_{\text{ц}}}. \quad (2.26)$$

На основании результатов эксперимента вычисляем следующие вспомогательные суммы регрессии [122]:

$$S_0 = \sum_{j=1}^N y_j, \quad (2.27)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^N X_{ji} y_j, \text{ где } i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.28)$$

$$S_{ik} = \sum_{j=1}^N X_{ji} X_{jk} y_j, \text{ где } i \neq k, \quad (2.29)$$

$$S_{ii} = \sum_{j=1}^N X_{ji}^2 y_j, \text{ где } i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.30)$$

Коэффициенты регрессии рассчитывали по следующим формулам [55]:

$$b_0 = \frac{2AB}{N} (S_0 B(n+2) - C \sum_{i=1}^n S_{ii}), \quad (2.31)$$

$$b_i = \frac{CS_i}{N}, \quad (2.32)$$

$$b_{ik} = \frac{C^2 S_{ii}}{BN}, i \neq k, \quad (2.33)$$

$$b_{ii} = \frac{AC}{N} \left\{ (S_{ii} C[(n+2)B - n] + C(1-B) \sum_{i=1}^n S_{ii} - 2BS_0) \right\}. \quad (2.34)$$

Оценку дисперсии воспроизводимости S_y^2 находим на основании результатов опытов, проведенных в центре плана. Для вычисления среднего значения $\bar{y}$ используем зависимость [122]:

$$\bar{y} = \frac{1}{N_{\text{ц}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{ц}}} y_j. \quad (2.35)$$

Тогда для числа степеней свободы $f = N_{\text{ц}} - k$ оценка дисперсии:

$$S_y^2 = \frac{1}{N_{\text{ц}} - k} \sum_{j=1}^N (y_j - \bar{y})^2. \quad (2.36)$$

Для проверки значимости коэффициентов уравнения регрессии их оценку проводят по критерию Стьюдента. Коэффициент значим, если выполняется условие [55]:

$$|b_i| \geq S_{bi} \cdot t_{\text{кр}}, \quad (2.37)$$

где S_{bi} – оценка среднеквадратичных отклонений соответствующих коэффициен-

тов регрессии; $t_{кр}$ – критическое значение критерия Стьюдента для выбранного уровня значимости α и числе степеней свободы:

$$f = N(K - 1), \quad (2.38)$$

где K – число параллельных опытов.

Если параллельные опыты не проводились, то число степеней свободы:

$$f = N_{ц} - 1. \quad (2.39)$$

в противном случае коэффициент регрессии можно исключить из уравнения.

Оценки дисперсий коэффициентов регрессии [3]:

$$S_{b_0}^2 = \frac{2AB(n+2)}{N} S_y^2, \quad (2.40)$$

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{N - N_{ц}}, \quad (2.41)$$

$$S_{b_{ik}}^2 = \frac{C^2 S_y^2}{N}, \quad (2.42)$$

$$S_{b_{ii}}^2 = \frac{AC^2 S_y^2}{N} [B(n+1) - (n-1)]. \quad (2.43)$$

Коэффициенты регрессии значимы, если выполняются следующие соотношения [122]:

$$\left. \begin{aligned} |b_0| &\geq t_{кр} S_{b_0} \\ |b_i| &\geq t_{кр} S_{b_i} \\ |b_{ik}| &\geq t_{кр} S_{b_{ik}} \\ |b_{ii}| &\geq t_{кр} S_{b_{ii}} \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

При ротатабельном центральном композиционном плане оценки коэффициентов при линейных членах и парных взаимодействиях не коррелированы с оценками остальных коэффициентов, а при квадратичных членах – коррелированы между собой и оценкой свободного члена. Исключение любого из квадратичных членов приводит к изменению оценок остальных, а также свободного члена b_0 .

Проверку адекватности полученной математической модели проводят по значению критерия Фишера, которое определяется соотношением [3]:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}, \quad (2.45)$$

где $S_{ад}^2$ – оценка дисперсии адекватности.

Оценку дисперсии адекватности рассчитывают по формуле [55]:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (y_j^э - y_j^р)^2 - S_y^2 (N_{ц} - 1)}{N - \frac{(n+2)(n+1)}{2} - (N_{ц} + 1)}, \quad (2.46)$$

где $y_j^э$ и $y_j^р$ – экспериментальное и расчетное значения функции отклика в j -м опыте.

Число степеней свободы f_a , связанное с оценкой этой дисперсии:

$$f_a = N - \frac{(n+2)(n+1)}{2}. \quad (2.47)$$

Проверяют выполнение условия [122]:

$$F_p \leq F_{кр}; \quad (2.48)$$

где $F_{кр}$ – критическое значение критерия Фишера для заданного уровня значимости $\alpha = 1 - P$, где P – доверительная вероятность.

Если выполняется условие (2.48), то математическая модель адекватно описывает поверхность отклика и ее можно использовать для целей оптимизации процесса.

Для записи математической модели в реальных физических величинах производят обратный переход от нормированного масштаба к натуральному по формуле (2.21).

2.5 Выводы по разделу

1. Проведенный анализ показал, что свойства электролитических покрытий, модифицированных дисперсными порошками, зависят от свойств и размеров частиц. Предпочтительными являются неэлектропроводные частицы, так как они практически не изменяют шероховатость получаемых покрытий. При этом большинство исследователей полагают, что чем меньше диаметр частиц, вносимых в электролит для получения композиционных покрытий, тем проще они зарастают покрытием и положительнее влияют на физико-механические свойства таких покрытий, в связи с этим частицы нанометрового диапазона являются предпочтительными.

2. Установлено, что основное негативное воздействие при гидроабразивном износе оказывает микрорезание поверхностей сопряжения твердыми абразивными частицами, что позволило выбрать в качестве основного расчетного уравнения

теоретического прогнозирования ресурса сопряжения интенсивность изнашивания для микрорезания при абразивном износе.

3. На основании литературных данных было установлено, что существенное влияние на упрочнение нанокomпозиционного электролитического покрытия оказывают дислокационные явления и точечные дефекты, а так же уменьшение размеров зерна покрытия, на основании чего была предложена математическая модель механизма упрочнения нанокomпозиционного электролитического покрытия.

4. На основании предложенной математической модели была получена зависимость микротвердости золотника, восстановленного и упрочненного нанокomпозиционным электролитическим покрытием, от материала частиц дисперсной фазы, их размера и концентрации в электролите. С учетом зависимости (2.18) по формуле определения ресурса золотниковой пары (2.9), можно теоретически спрогнозировать ресурс сопряжения восстановленного с применением нанокomпозиционного электролитического покрытия.

3 ПРОГРАММА И ОБЩАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа исследований

Исходя из поставленных задач и цели исследований, предложена следующая программа исследований:

- получение нанокomпозиционных покрытий на основе железа;
- исследование влияния наноразмерных порошков на микротвердость электролитического покрытия железа;
- исследование прочности сцепления покрытия с основой;
- исследование морфологии и химического состава нанокomпозиционных электролитических покрытий на основе железа;
- ускоренные сравнительные трибологические испытания;
- ускоренные коррозионные испытания;
- стендовые и эксплуатационные испытания гидрораспределителей Р160.

Для исключения влияния не исследуемых параметров на результаты исследований было предусмотрено следующее:

1. Группы образцов изготавливали из одного материала; электролитические покрытия наносили из электролитов одинакового химического состава на одном оборудовании, расположенном в одном помещении; химические реагенты имели одинаковую чистоту и были из одной партии; покрытия наносили по одинаковой технологии при строгом соблюдении всех режимов.

2. Температуру воздуха в лаборатории поддерживали в пределах 20...22 °С; относительную влажность воздуха – 45–55 %.

3. Электролит корректировали после покрытия трех образцов, а также перед каждым началом работы.

4. Покрытия наносили толщиной 0,2–0,25 мм.

5. Для получения электролитов, кислотных и щелочных растворов, а также для корректировки ванны и компенсации испарения электролита применяли дистиллированную воду.

Влияние наноразмерных порошков твердых частиц на микротвердость электролитических покрытий железа изучали с помощью микротвердомера ПМТ-3 по

ГОСТ 9450–76 [49]. Морфологию покрытий исследовали с помощью комплекса на базе растрового электронного микроскопа «MIRA II TESCAN». Ускоренные сравнительные трибологические испытания проводили на машине трения МИ-1М по ГОСТ 23.224–86 [39]. Ускоренные коррозионные испытания осуществляли при переменном погружении в раствор по ГОСТ 9.308–85 [48]. Стендовые ускоренные износные испытания проводили в соответствии с ОСТ 1.00228–77 и ОСТ 114.68.9.542–85 [100, 102]. При эксплуатационных испытаниях восстановленные гидрораспределители устанавливали на тракторы К-700А, выполняющие различные виды нормированных сельскохозяйственных работ.

Технологический процесс восстановления золотниковых пар гидрораспределителей Р160 разрабатывали согласно техническим требованиям с учетом высокой производительности и экономической эффективности.

Таким образом, исследования носили комплексный характер, что позволило правильно оценить влияние наноразмерного материала на наноконпозиционное электролитическое железнение при восстановлении золотниковых пар.

3.2 Методика получения наноконпозиционных покрытий на основе железа

Для нанесения наноконпозиционных покрытий на основе железа был проведен анализ существующих электролитов получения покрытий на основе железа. В ремонтном производстве к электролитам предъявляют следующие требования [65, 94]:

- 1) электролит должен обеспечивать возможность получения на деталях покрытий с высокими физико-механическими свойствами;
- 2) свойства получаемых покрытий должны находиться в строгом соответствии с заданными режимами электролиза и регулироваться этими режимами в широких пределах;
- 3) процесс получения покрытий должен быть максимально производительным;
- 4) электролит должен быть простым по составу и надежным в эксплуатации;
- 5) применяемые для приготовления реактивы должны быть дешевыми и недефицитными;

6) способы контроля и корректировки электролита должны быть простыми и доступными.

Этим требования в полной мере удовлетворяют хлористые электролиты железнения. В практике электроосаждения железа применяются два вида электролитов – холодные и горячие [111, 142]. Использование горячих хлористых электролитов обусловлено их преимуществами по сравнению с холодными. Из горячих электролитов железо осаждается с меньшим перенапряжением, что обеспечивает большую производительность процесса осаждения. Электролит допускает применение высокой плотности катодного тока до 50 А/дм^2 . Нанесение покрытий железа в горячих электролитах протекает с высоким выходом металла по току (до 90–95 %) и со скоростью осаждения до 0,4–0,5 мм/ч. Электролиты позволяют получать плотные мелкозернистые покрытия толщиной до 1,5 мм с высокими механическими свойствами, которые могут изменяться в широких пределах в зависимости от условий электролиза. Процесс осаждения железа при этом отличается стабильностью, а нарушение режимов электролиза не так резко отражается на качестве покрытий, как в других типах электролитов.

Горячие хлористые электролиты железнения исследованы достаточно детально. В литературе [11, 55, 84, 105, 109, 127, 128] представлены многочисленные рекомендации по выбору условий электролиза, позволяющие получать покрытия с требуемыми физико-механическими свойствами. В соответствии с этими рекомендациями был выбран среднеконцентрированный горячий хлористый электролит железнения, принятый за основу для получения покрытия и исследования его физико-механических свойств. Его состав, г/л [41, 46]:

- хлорид железа ТУ 6-02-609-86 ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) – 200...300;
- соляная кислота ГОСТ 3118–77 (HCl) – 1...1,5;
- хлористый марганец ГОСТ 612–75 (MnCl_2) – 5...10.

Режимы электролиза:

- плотность катодного тока – 20 А/дм^2 ;
- температура электролита – 80°C .
- время нанесения покрытий – 90 мин под действием тока прямой полярности.

Анализ существующих технологий создания наноразмерных материалов для модификации электролитических покрытий позволил выбрать метод плазменной переконденсации, которым получают порошки различных металлов размером частиц от 10^{-5} до 10^{-4} мм. Метод основан на испарении крупнодисперсного порошка (сырья) в плазменном потоке с температурой 4500...6000 °С и конденсации пара в виде частиц требуемого размера [103-105]. На рисунках 3.1 и 3.2 представлены внешний вид и принципиальная схема установки для получения наноразмерных порошков (НРП).

Полученные порошки характеризовались следующими параметрами: размер частиц – от 10^{-5} до 10^{-4} мм, их удельная поверхность – 100–150 м²/г, форма – сферическая.

При выборе материала НРП для модификации электролитических покрытий на основе железа руководствовались рабочей гипотезой:

- частицы НРП должны обладать высокой твердостью для увеличения микротвердости покрытия;
- частицы НРП должны быть химически стойкими в электролите железнения и иметь хорошую смачиваемость;
- частицы НРП должны повышать физико-механические свойства покрытия, такие, как износостойкость и коррозионная стойкость.

Исходя из предъявляемых требований, а также на основании литературных источников и проведенных ранее исследований в данном направлении [20, 105, 117, 131, 149-152, 154, 155, 157, 158, 160, 161], для получения НКЭП была предложена следующая группа НРП в концентрациях 1, 3, 5 г/л: карбид вольфрама (WC), карбид кремния (SiC), карбид титана (TiC), нитрид алюминия (AlN) и оксид алюминия (Al₂O₃).

Электролит-суспензию на основе железа готовили в несколько этапов. Для разагрегатирования частиц и повышения седиментационной устойчивости электролита готовили концентрированную суспензию. Рецептурное количество наноразмерных частиц предварительно заливали электролитом и путем растирания их в течение 10 мин доводили суспензию до пастообразного состояния. Затем в смесь дополнительно добавляли электролит и получали концентрированную суспензию, которую далее обрабатывали с помощью ультразвукового генератора

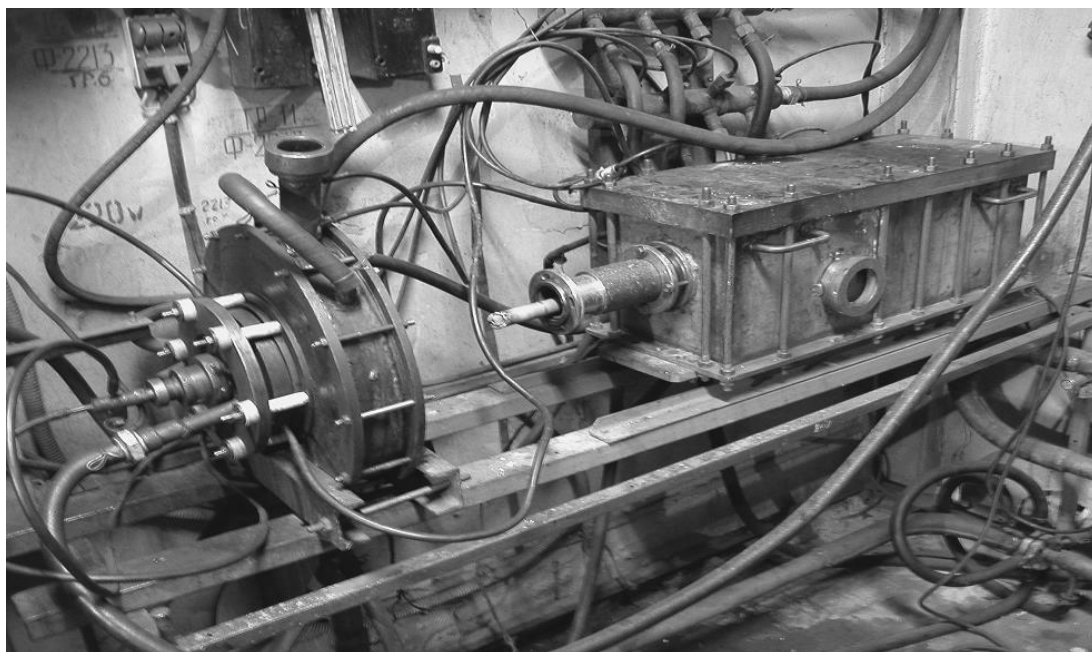


Рисунок 3.1 – Установка для получения НРП

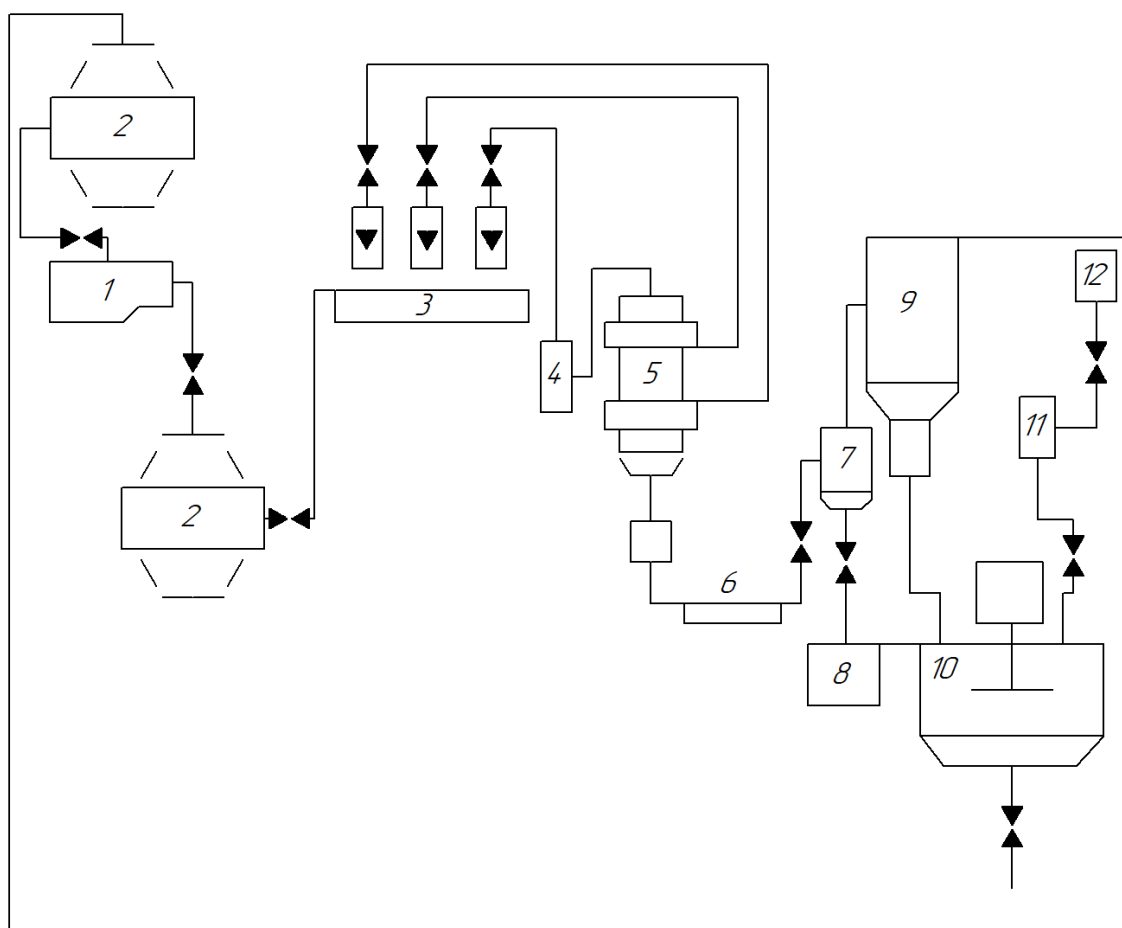


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема установки для получения НРП методом плазменной переконденсации: 1 – компрессор; 2 – ресивер; 3 – газовая рампа; 4 – дозатор для дисперсного сырья; 5 – плазменный испаритель; 6 – холодильник; 7 – циклон; 8 – бункер улавливания; 9 – фильтр; 10 – реактор; 11 – дозатор для жидкого углеводорода; 12 – емкость с жидким углеводородом

УЗГ-2М (рисунок 3.3) с частотой 22 кГц и амплитудой 50Гц течение 10–12 мин.



Рисунок 3.3 – Ультразвуковой генератор УЗГ-2М

Далее полученную суспензию вносили в ванну железнения при интенсивном перемешивании электролита [105].

Технологический процесс получения НКЭП состоял из нескольких основных операций:

- подготовка поверхности детали;
- нанесение покрытия на образец;
- нейтрализация полученного покрытия;
- контроль толщины покрытия;

контроль качества покрытия.

Подготовка поверхности детали к нанесению покрытий включала в себя обезжиривание и декапирование [78, 142].

Обезжиривание детали проводили в 10%-м растворе гидроксида натрия ГОСТ Р 55064–2012 (NaOH) [52]. Режим обработки:

- температура электролита – 50 °С;
- плотность катодного тока – 20 А/дм²;
- время обезжиривания – 5 мин под действием тока прямой полярности.

Затем образцы промывали в горячей воде при температуре 70–80 °С в течение 1–2 мин и далее в проточной воде при комнатной температуре в течение 1–2 мин.

Для удаления с поверхности детали жировых пленок, окалины и продуктов коррозии проводили ее декапирование в 30 %-м растворе серной кислоты ГОСТ 2184–2013 (H₂SO₄) [38].

Режим обработки:

- температура электролита – 30 °С;
- плотность катодного тока – 10 А/дм²;
- время травления – 1 мин под действием тока прямой полярности.

После декапирования деталь промывали в проточной воде комнатной температуры в течение 1–2 мин.

Нанесение покрытия на образец проводили на лабораторном гальваническом оборудовании (рисунок 3.4), схема которого представлена на рисунке 3.5.



Рисунок 3.4 – Оборудование для нанесения нанокomпозиционных электролитических покрытий

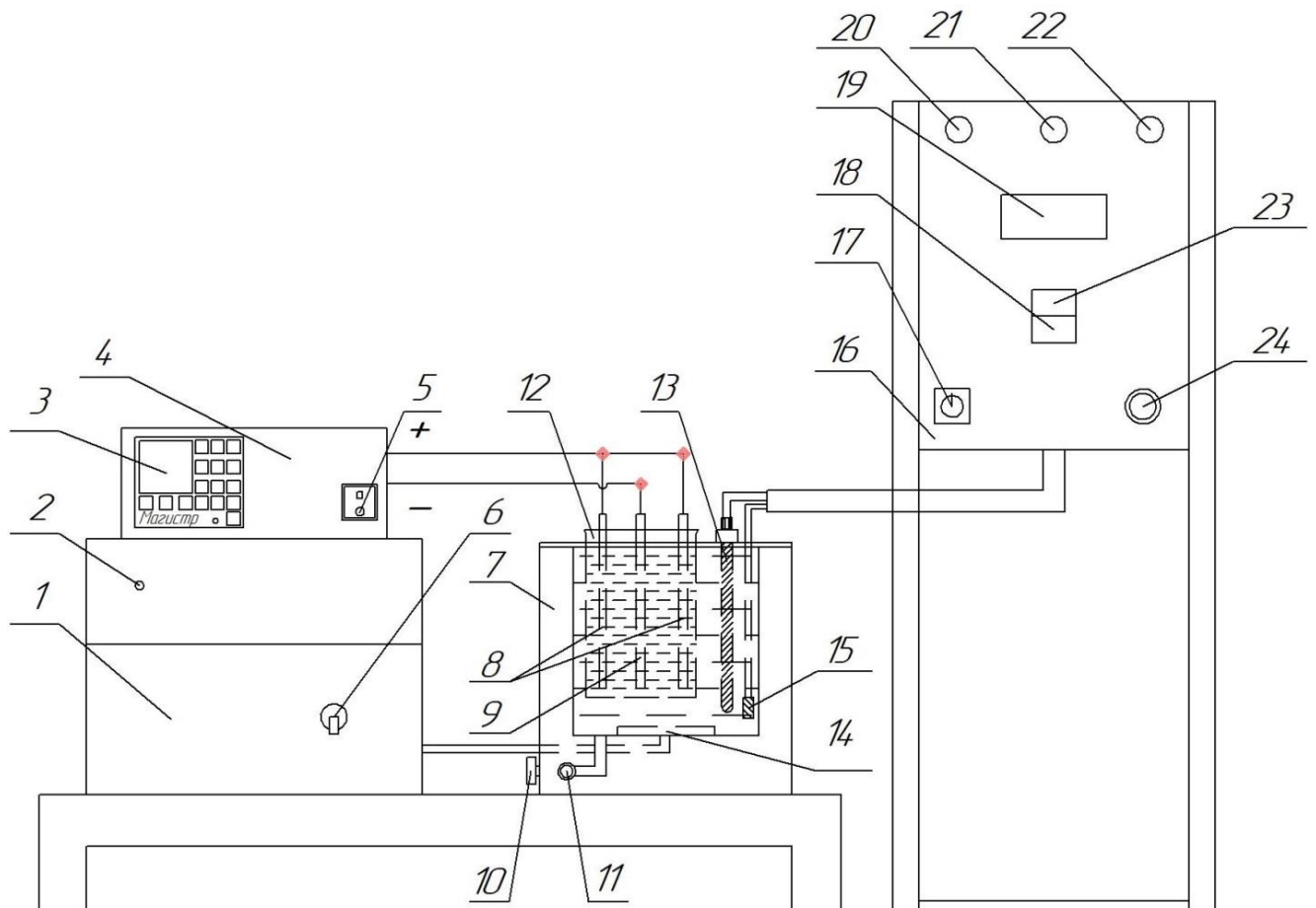


Рисунок 3.5 – Схема лабораторного гальванического оборудования: 1 – ультразвуковой генератор (УЗГ); 2 – индикатор работы УЗГ; 3 – информационное табло и панель управления источником тока; 4 – источник тока ГИТП 500-30(5)х12Р-220-П2/-В2; 5 – кнопка включения (выключения) источника тока; 6 – тумблер включения (выключения) УЗГ; 7 – установка для нанесения нанокпозиционных электролитических покрытий; 8 – аноды; 9 – катод (деталь); 10 – сливной кран; 11 – сливной канал; 12 – емкость для электролита; 13 – ТЭН; 14 – ультразвуковой элемент; 15 – температурный датчик; 16 – шкаф автоматического управления температурой; 17 – тумблер включения (выключения) шкафа управления температурой; 18 – кнопка остановки автоматического регулирования температуры; 19 – информационное табло и панель управления шкафа; 20 – индикатор питания; 21 – индикатор нагрева; 22 – индикатор уровня жидкости; 23 – кнопка включения автоматического регулирования температуры; 24 – аварийное отключение шкафа

Оборудование включает в себя установку 7 для нанесения нанокпозиционных электролитических покрытий собственного изготовления, оснащенную тремя ультразвуковыми элементами 14, соединенную с ультразвуковым генератором 1. Под действием ультразвука происходят разагрегатирование частиц до нанометрового диапазона, сопротивление их коагуляции, а также подвод наноразмерных частиц к

катоду для лучшего зарастания их электролитическим покрытием [56, 77]. Поддержание температуры осуществляется шкафом автоматического управления температурой 16, к которому подключены ТЭН 13 и температурный датчик 15. Поддержание заданной плотности катодного тока осуществляется посредством источника тока 4.

Нейтрализацию полученного покрытия проводили в 30%-м растворе гидроксида натрия ГОСТ Р 55064–2012 (NaOH) [52]. Режимы обработки:

- температура раствора 50 °С;
- время обработки – 10 мин.

Контроль толщины покрытия осуществляли с помощью микрометрической скобы СР 25 ГОСТ 11098–75 [32]. Образцы с толщиной покрытия менее 0,2 мм и более 0,25 мм выбраковывали.

Контроль качества покрытия осуществляли по ГОСТ 9.302–88 [47]. Образцы с вздутиями, порами, непокрытыми участками и с отслаиванием покрытия выбраковывали.

В процессе работы гальванической ванны состав электролита непрерывно менялся. Для поддержания заданной концентрации компонентов электролит корректировали путем введения в него новых порций компонентов в соответствии с методикой [55, 82]. Анализ и корректировку электролита проводили после каждой партии из трех деталей в процессе работы и перед запуском ванны в работу каждый день. Для простоты каждодневной корректировки ванны ее работу завершали вместе с завершением нанесения покрытия на очередную партию из трех деталей. Испарившуюся воду доливали в электролит только при корректировке. Для корректировки pH использовали 10%-й раствор соляной кислоты (HCl). Добавление 100 мл этого раствора повышает значение pH на 0,1. Показатель pH измеряли перед загрузкой каждой партии деталей ионометрическим преобразователем И-500 (рисунок 3.6).

3.3 Методика исследования влияния наноразмерных твердых частиц на микротвердость электролитического покрытия железа

Для определения наиболее эффективного вида и концентрации наноразмерного материала в электролите с целью повышения показателей микротвердости



Рисунок 3.6 – Ионометрический преобразователь И-500

были проведены лабораторные испытания. Исследуемое покрытие наносили на образцы в виде прутков, изготовленные из среднеуглеродистой стали 40 ГОСТ 1050–2013 [31] длиной 200 мм и диаметром 7 мм по описанной ранее методике. Концентрацию наноразмерных порошков, вносимых в электролит, выбирали опытно-экспериментальным путем. Эффективность применяемого наноразмерного материала оценивали по величине микротвердости получаемого покрытия. После определения наиболее эффективного наноразмерного материала и его концентрации в электролите все дальнейшие исследования НКЭП проводили только с выбранными видом и концентрацией частиц.

Микротвердость электролитических покрытий изучали с помощью прибора ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды согласно ГОСТ 9450–76 по методу восстановленного отпечатка (рисунок 3.7) [49]. Испытание на микротвердость вдавливанием по методу восстановленного отпечатка заключается в нанесении на испытуемую поверхность образца отпечатка под действием статической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику в течение определенного времени. После снятия нагрузки и измерения параметров полученного отпечатка для четырехгранной пирамиды с квадратным основанием микротвердость определяли по формуле:

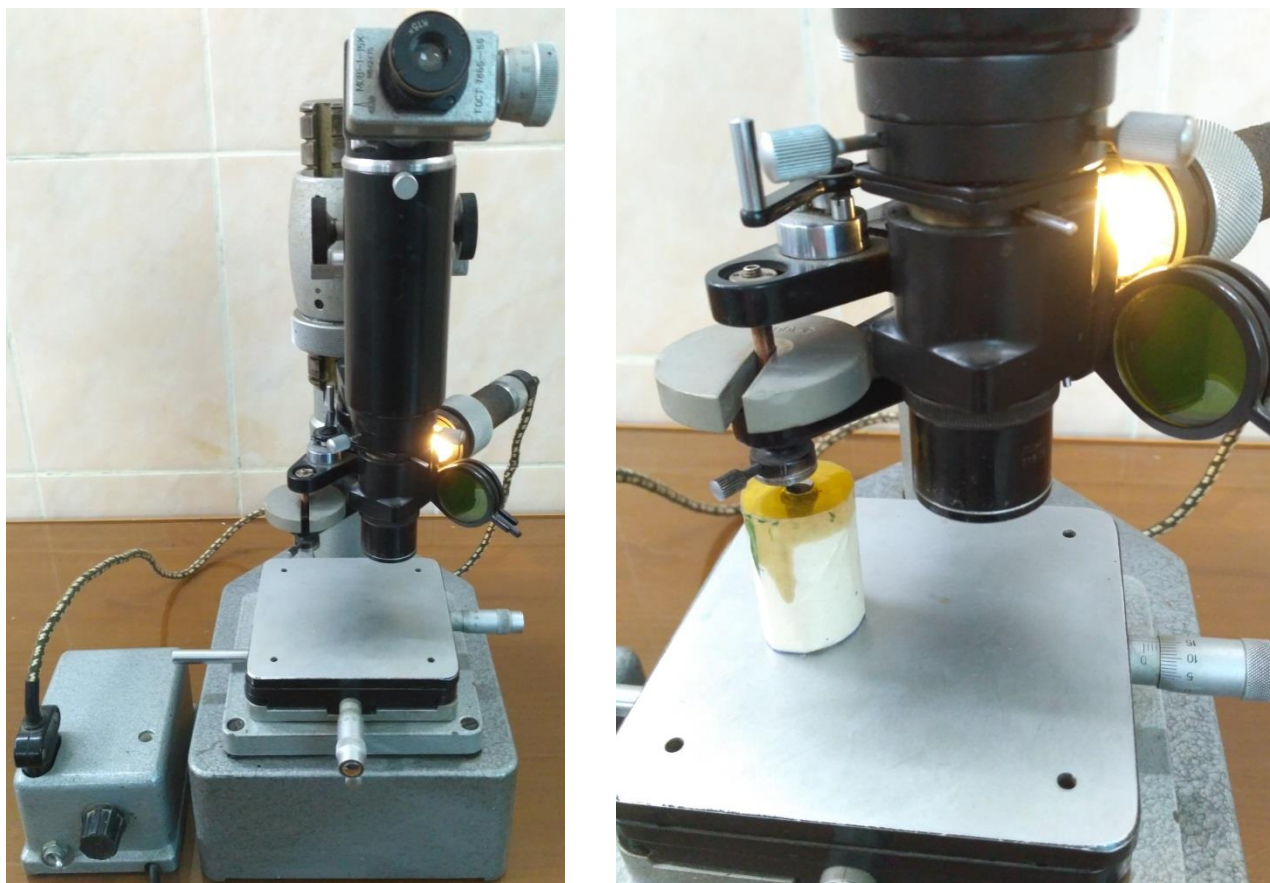


Рисунок 3.7 – Микротвердомер ПМТ-3

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{0,102 \cdot 2F \sin d/2}{d^2} = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2}, \quad (3.1)$$

где HV – микротвердость с указанием продолжительности приложения нагрузки; F – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, Н; S – условная площадь боковой поверхности полученного отпечатка, мм²; d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей квадратного отпечатка, мм. Сила давления на индентор – 0,981 Н, время приложения усилия через индентор на образец – 10 с. Анализ результатов измерения микротвердости НКЭП основан на предположении о неоднородности фазового состава покрытий, наличии пор и дефектов, ошибок при измерении, в связи с чем микротвердость считали как среднее значение трех размеров отпечатков для каждого образца.

Для того чтобы из результатов исследования исключить влияние твердости материала, на который наносится покрытие, исследование микротвердости целесообразно проводить на металлографических шлифах [88]. Для их изготовления брали бумажные цилиндры длиной 60 мм и диаметром 20 мм. От прутков с нане-

сенным НКЭП ленточной пилой JET MBS-56CS отрезали заготовки длиной 20 мм, которые размещали внутри бумажных цилиндров по центру перпендикулярно плоскости ее основания, заливали эпоксидной смолой марки ЭП-10 и выдерживали в течение 72 ч. Затвердевшие образцы обрезались на алмазном станке SYJ-150 (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Алмазный отрезной станок SYJ-150

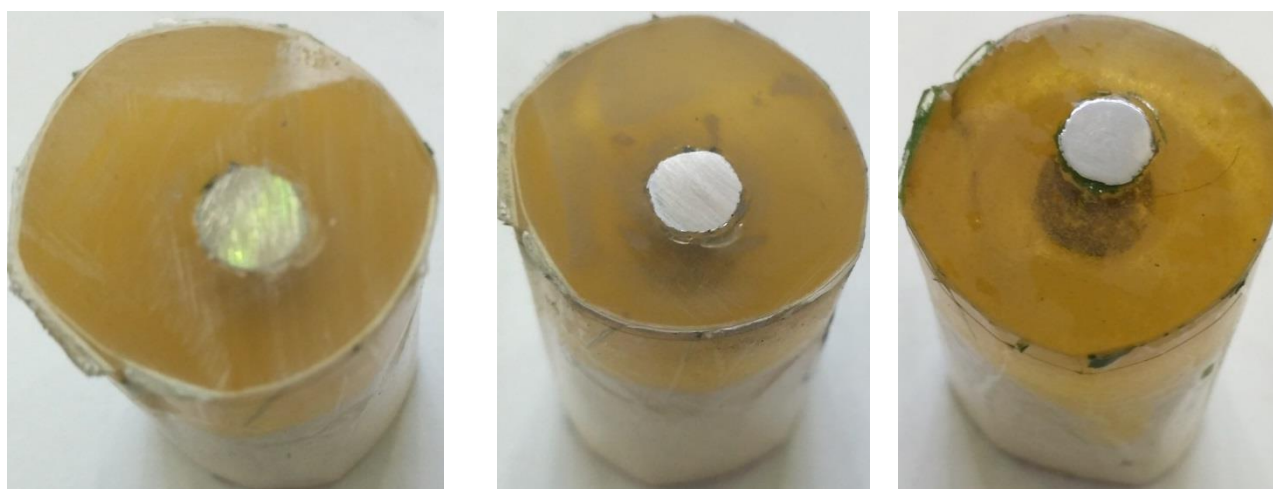
Поверхность отрезанных образцов обрабатывали на шлифовально-полировальном станке 3E881 «Neris» (рисунок 3.9) в несколько этапов: тонкое шлифование (рисунок 3.10, а), черновая (рисунок 3.10, б) и чистовая (рисунок 3.10, в) полировки. Режимы механической обработки приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Режимы механической обработки образцов на шлифовально-полировальном станке 3Е881 «Neris»

Режимы и расходные материалы	Тонкое шлифование	Полировка черновая	Полировка чистовая
Тип суспензии	10%-й раствор оксида хрома в дистиллированной воде		
Частота вращения диска, мин ⁻¹	150		
Время операции, мин	2	2	До выведения следов износа



Рисунок 3.9 – Шлифовально-полировальный станок 3Е881 «Neris»



а

б

в

Рисунок 3.10 – Металлографические шлифы: *а* – после тонкого шлифования; *б* – после черновой полировки; *в* – после чистовой полировки

3.4 Методика определения прочности сцепления покрытия с основным металлом

В процессе эксплуатации покрытие подвергается влиянию температуры, механических нагрузок и других внешних и внутренних сил. Наиболее напряженное место в покрытии – граница раздела между ним и основным металлом детали. В связи с этим для испытания полученных НКЭП на прочность сцепления с основой были выбраны три метода: метод опиловки, метод изгиба и метод изменения температур согласно ГОСТ 9.302–88 [47].

Покрытие наносили на образцы в виде пластин размерами 100×20×2 мм, изготовленных из среднеуглеродистой стали 25 ГОСТ 1050–2013 [31]. Для достоверности результатов при каждом эксперименте было исследовано пять образцов с покрытием.

Для проведения испытания прочности сцепления покрытия методом опиловки образцы отпиливали на расстоянии не менее 2 мм от края, перпендикулярно поверхности покрытия. Образец зажимали в тисках и опиловали по срезу напильником с набором мелких зубьев. Опиловку проводили в направлении от основного металла к покрытию под углом 45°. После контроля таким способом не должно быть отслаивания покрытия.

Метод изгиба заключался в испытании пластинчатых образцов на изгиб под углом 90° в обе стороны. При высокой прочности сцепления отслаивание покрытия должно отсутствовать.

При использовании метода изменения температур образцы с покрытием нагревали в муфельной печи СНОЛ 12/16 до температуры 300 °С, выдерживали при данной температуре в течение 15 мин и быстро охлаждали в воде температурой 15...25 °С. Прочность сцепления покрытия с основой оценивали по наличию на поверхности образцов вздутий, трещин и отслаивания.

3.5 Методика исследования морфологии поверхности и химического состава покрытий

3.5.1 Методика исследования морфологии поверхности покрытий

Морфологию поверхности полученных покрытий исследовали с помощью растрового электронного микроскопа «MIRA II TESCANA» (рисунок 3.11). Определяли характер распределения модификаторов в матрице покрытия, принципиальные различия между покрытием без включения наноразмерных частиц и нанокomпозиционным покрытием.

Исследованиям подвергали поверхности покрытий без механической обработки, непосредственно после процесса нанесения покрытия. Покрытия наносили на пластины размерами $100 \times 15 \times 2$ мм, изготовленные из среднеуглеродистой стали 25 ГОСТ 1050–2013 [31].



Рисунок 3.11 – Исследовательский комплекс «MIRA II TESCANA»

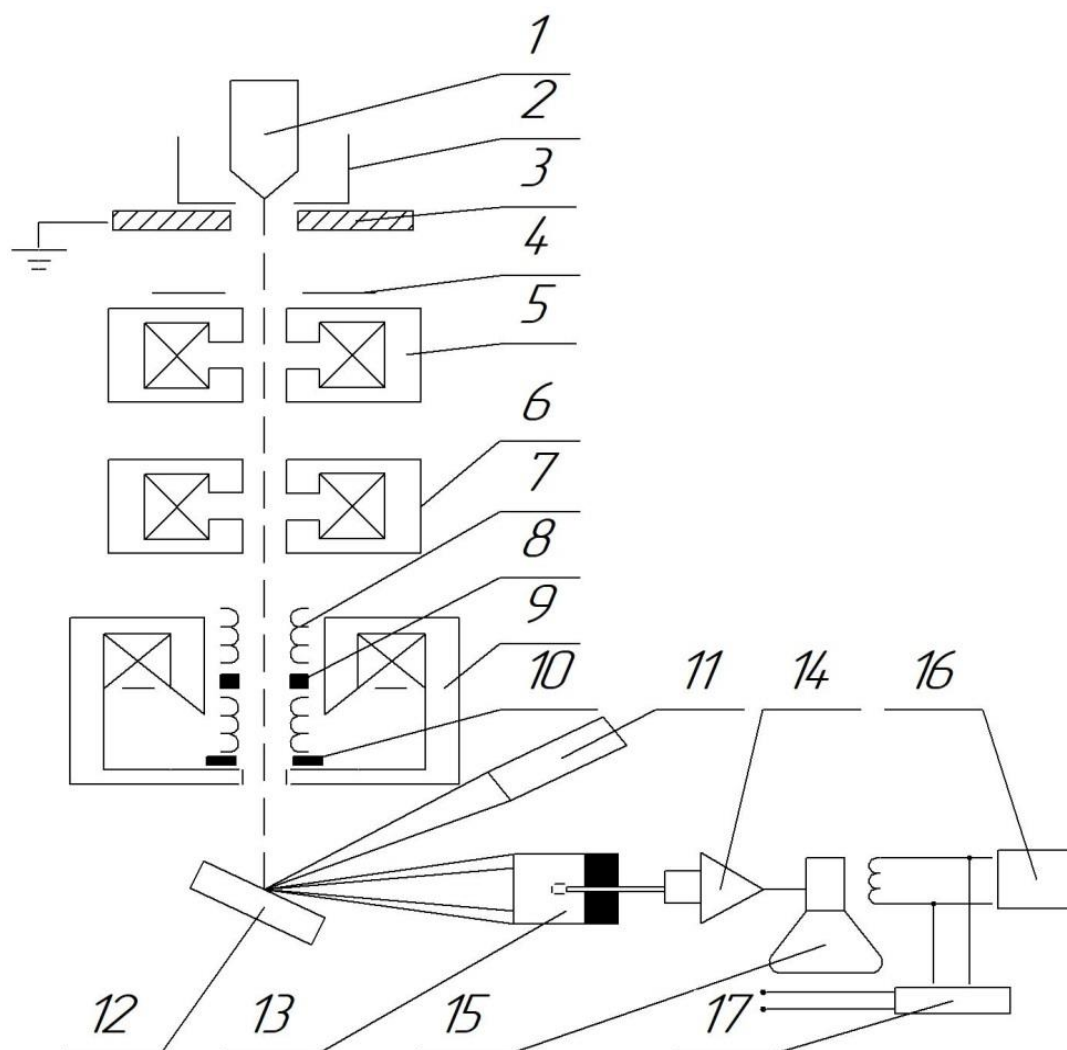


Рисунок 3.12 – Принципиальная схема РЭМ: 1 – катод; 2 – цилиндр Венельта; 3 – анод; 4, 10 – диафрагма; 5, 6, 9 – электронные линзы; 7 – электромагнитные катушки; 8 – стигматор; 11 – спектрометр; 12 – образец; 13 – детектор; 14 – усилитель; 15 – электронно-лучевая трубка; 16 – генератор; 17 – гониометр

Исследовательский комплекс на базе РЭМ «MIRA II TESCAN» снабжен микроанализаторами химического состава, что позволило получить более полную информацию об исследуемом покрытии.

В основу определения химического состава покрытия положен метод дифракции отраженных электронов. Важной особенностью дифракции является ее зависимость от атомного номера элементов. Если атомный номер элемента в точке падения первичного пучка электронов мал (легкие атомы), то образуется меньшее количество отраженных электронов с малым запасом энергии. В обла-

стях образца, содержащих высокую концентрацию атомов с большим атомным номером (тяжелые атомы), большее число электронов отражается от этих атомов. Эти закономерности используют при получении элементного состава образца.

3.6 Методика ускоренных сравнительных трибологических испытаний

Сравнительные трибологические испытания НКЭП на основе железа проводили в условиях трения скольжения на машине трения МИ-1М (рисунок 3.13), принципиальная схема которой представлена на рисунке 3.14. Контактное взаимодействие образцов осуществляли по схеме «ролик – колодка» (рисунок 3.15).



Рисунок 3.13 – Машина трения МИ-1М

Для получения достоверных результатов исследования экспериментальные образцы были сделаны из материалов, идентичных материалам соответствующей пары трения гидрораспределителя Р160 3/1-222. Для роликов была использована сталь 15Х ГОСТ 4543–2016 [44]. Их диаметр 50 мм, ширина – 10 мм.

Ролики подвергали поверхностной закалке до твердости HV 655...800, затем шлифовали и полировали до получения шероховатости рабочей поверхности $R_a = 0,32$ мкм [74]. Колодки изготавливали из чугуна СЧ 21 ГОСТ 1412–85 [33] с наружным диаметром 68 мм, внутренний диаметр шлифовали

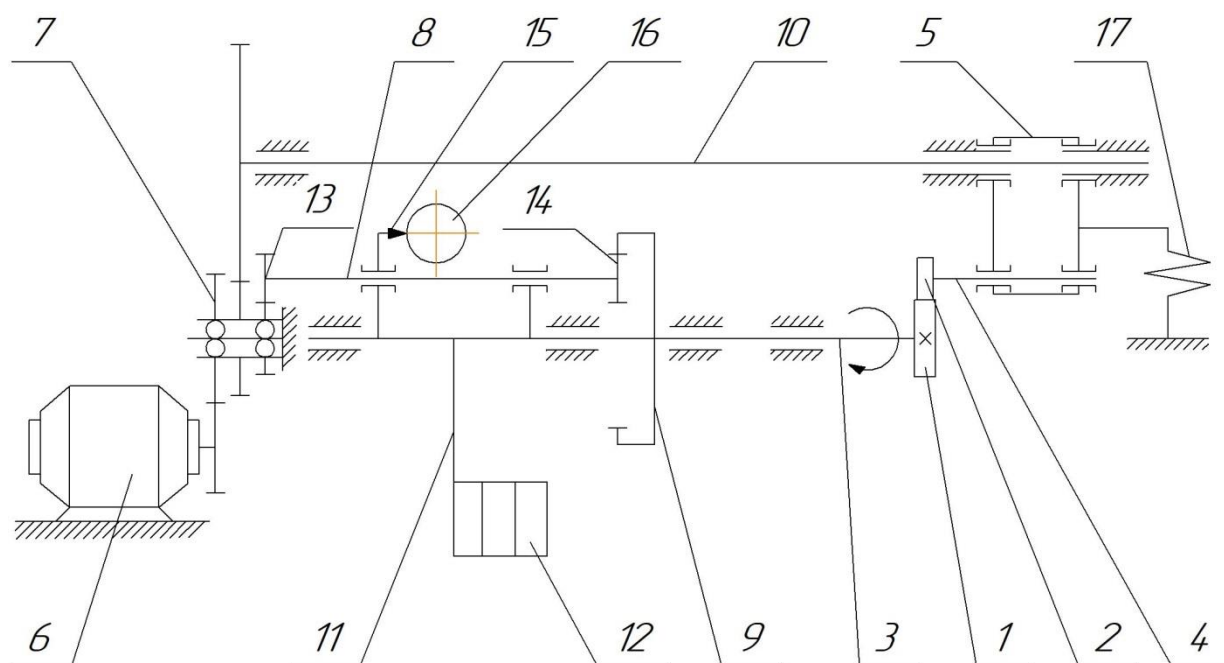


Рисунок 3.14 – Схема машины трения МИ-1: 1 – ролик; 2 – колодка; 3 – шпиндель; 4 – вал каретки; 5 – корпус каретки; 6 – электродвигатель; 7 – блок зубчатых колес; 8, 10 – валы; 9 – зубчатое колесо с внутренним зацеплением; 11 – маятник; 12 – грузы; 13, 14 – зубчатые колеса; 15 – карандаш; 16 – барабан; 17 – нагрузочное устройство

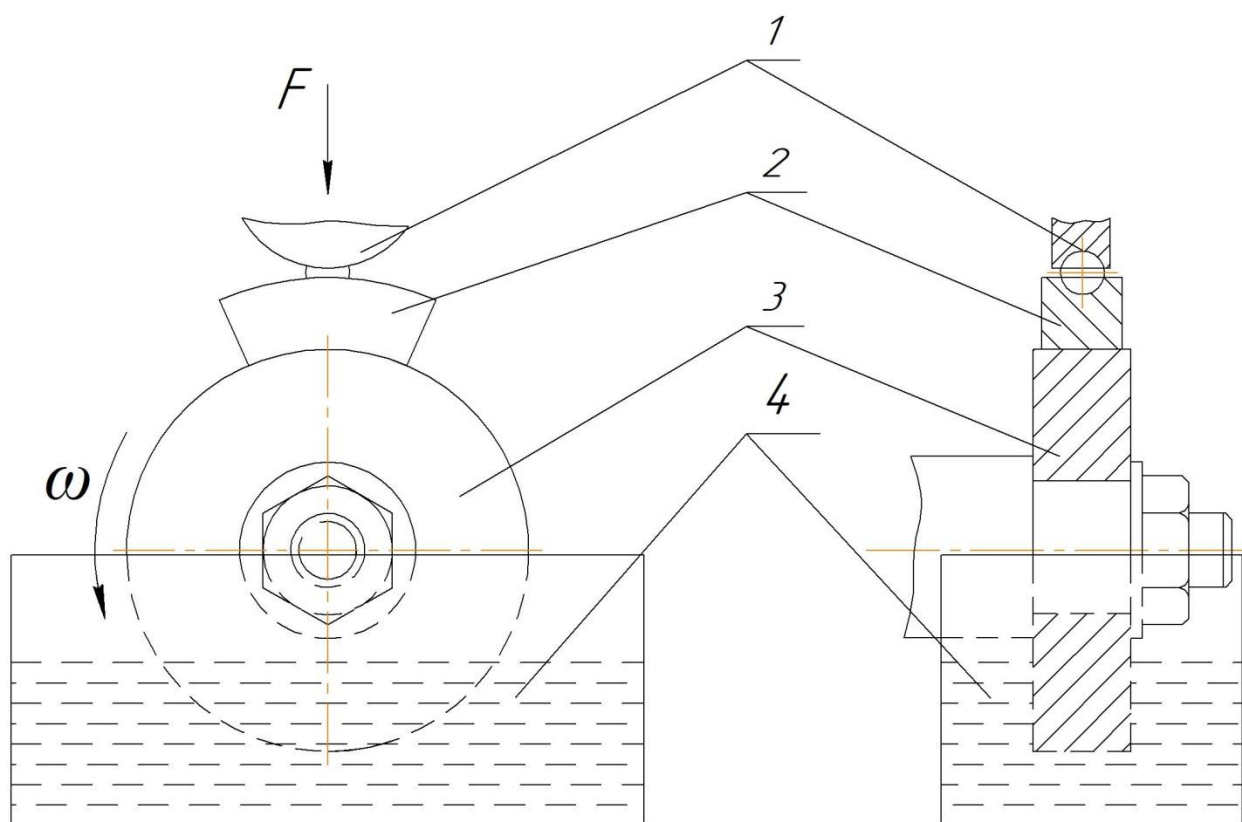


Рисунок 3.15 – Схема «ролик – колодка»: 1 – фиксатор колодки; 2 – колодка; 3 – ролик; 4 – смазочная среда, F – приложенная сила, Н; ω – частота вращения ролика, мин^{-1}

под размер ролика и полировали до получения шероховатости рабочей поверхности $R_a = 0,32$ мкм. Твердость колодок соответствовала твердости корпуса гидрораспределителя HV 179...252. Коэффициент взаимного перекрытия образцов составил 0,11.

Испытания проводили согласно ГОСТ 23.224–86 [39] в двух средах – на чистом и загрязненном индустриальном масле И-20 ГОСТ 20799–88 [37]. В качестве загрязнителя использовали кварцевый абразив $1K_1O_101$ ГОСТ 2138–91 [38] с размерами частиц 0,008...0,012 мм при концентрации 0,08 % по массе смазочной среды.

Режимы испытаний устанавливали на основании предварительных экспериментов. При этом выбирали такие режимы, которые обеспечивали бы получение ощутимых износов пар трения за минимальное время. Перед испытаниями с целью формирования начальной микрогеометрии и структуры рабочих поверхностей образцы пар трения подвергали приработке при режимах, приведенных в таблице 3.2.

Смазку образцов осуществляли путем захвата масла роликом, погруженным в масляную ванну. Это обеспечивало равномерность подачи смазки в каждом опыте. При испытании в загрязненной смазочной среде кварцевые абразивные частицы перемешивали с индустриальным маслом И-20 в пропорции 50/50 и подавали непосредственно в зону трения мерным шприцем с периодичностью 5 мин.

Таблица 3.2 – Режимы лабораторных испытаний

Наименование испытания	Нагрузка, Н	Частота вращения ролика, мин ⁻¹	Смазочная среда	Продолжительность испытания, ч
Приработка	850	440	Масло И-20	3
Испытания в чистой смазочной среде				6
Испытания в загрязненной смазочной среде			Масло И-20, загрязненное кварцевым абразивом	

Нагрузку прикладывали на верхний образец через предварительно оттарированный механизм нагружения машины трения МИ-1М. Тарировочный график механизма нагружения приведен на рисунке 3.16. Пуск и остановку машины осу-

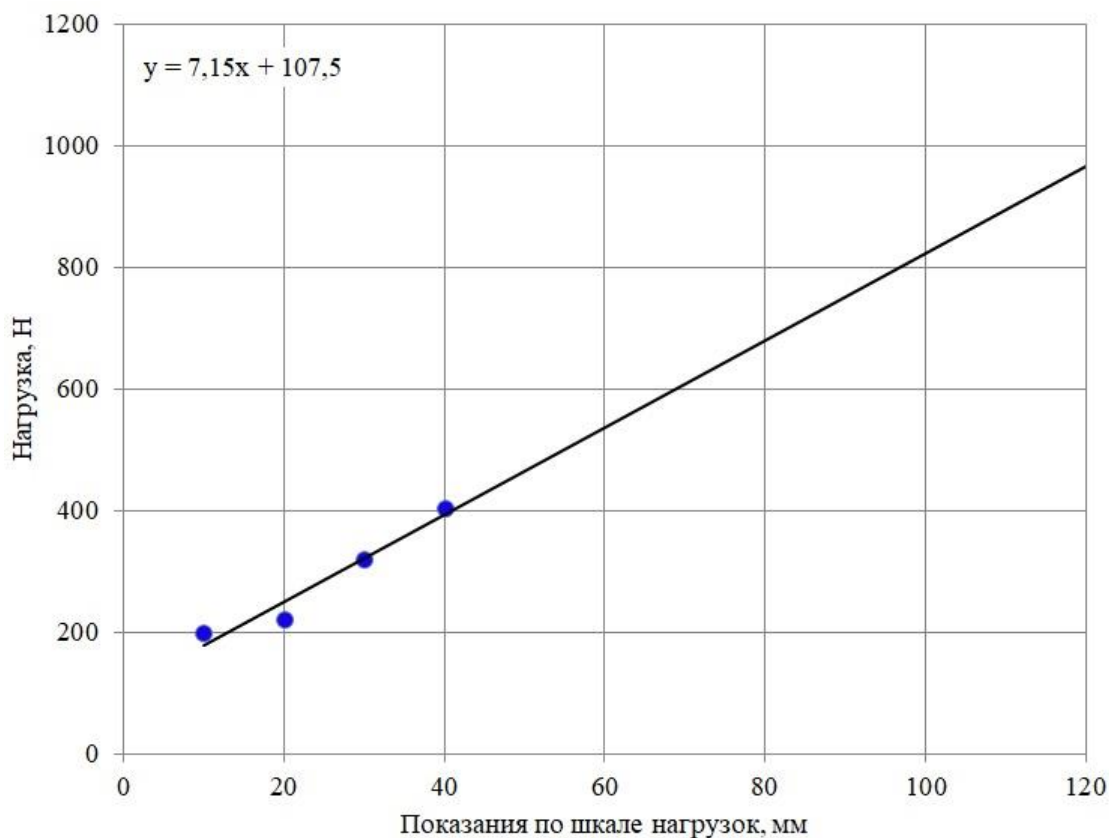


Рисунок 3.16 – Тарировочный график механизма нагружения машины трения МИ-1М

ществляли при отсутствии нагрузки на образцы. После запуска привода нагрузку плавно довели до требуемой величины в течение 1 мин.

В процессе испытаний фиксировали следующие параметры: суммарный износ образцов по массе и момент трения в испытываемой паре.

Непрерывное измерение момента трения на машине трения производилось с помощью маятникового механизма 11 (см. рисунок 3.14). Действительные значения момента трения определяли по тарировочному графику (см. рисунок 3.16), построенному в статическом режиме согласно инструкции по эксплуатации машины трения.

Износ образцов определяли их взвешиванием на весах HR-250AZG 1-го класса точности ГОСТ OIML R 76–1–2011 [53]. Перед каждым взвешиванием детали промывали в бензине и высушивали в течение 1 ч в сушильном шкафу ПЭ-0042 при температуре 80 °С.

3.7 Методика коррозионных испытаний

Коррозионные испытания исследуемых покрытий проводили согласно ГОСТ 9.308–85 [48] при переменном погружении в раствор. Сущность метода заключается в ускорении коррозионного процесса чередованием погружения образцов в раствор и высушивании их на воздухе с помощью установки для коррозионных испытаний (рисунок 3.17).

Установка для коррозионных испытаний состоит из ванны с 3%-м раствором хлористого натрия (NaCl), ч.д.а., ГОСТ 4233–77 [42], и механизма, осуществляющего попеременное погружение в раствор и подъем из него подвешенных на нем образцов. Конструкция обеспечивает полное погружение части образцов с нанесенным покрытием в раствор в вертикальном положении. Для автоматизации процесса предусмотрено программное управление установкой. Управляющая программа представлена в приложении Б.

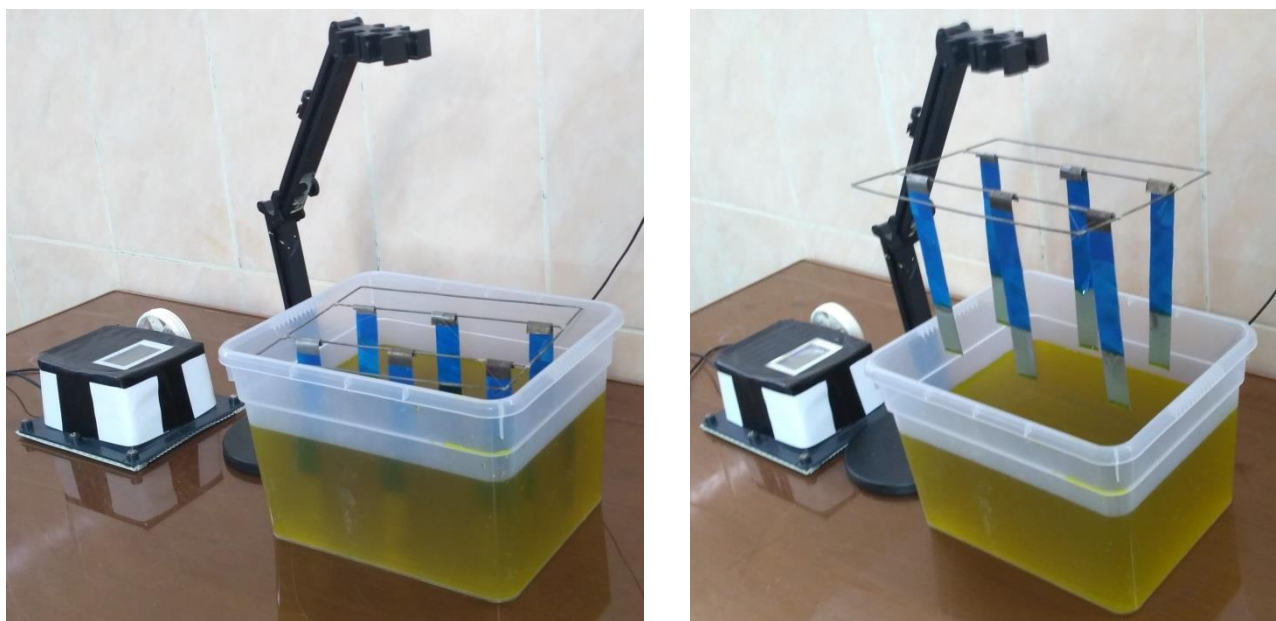


Рисунок 3.17 – Установка для коррозионных испытаний

Для проведения испытаний образцы изготавливали в виде пластин размерами $100 \times 15 \times 2$ мм из стали 15Х ГОСТ 4543–2016 [44] в количестве 18 шт.

На шесть из них наносили классическое электролитическое покрытие на основе железа, на другие шесть – НКЭП на основе железа и шесть образцов

испытывали без нанесения покрытия. Перед испытанием образцы взвешивали на аналитических весах HR-250AZG 1-го класса точности ГОСТ OIML R 76–1–2011 [53], подготавливали по ГОСТ 9.909–86 [51], после чего их помещали на металлическую рамку установки для коррозионных испытаний, по два образца каждого вида, чередуя через один по диагонали.

Объем раствора в ванне устанавливали в зависимости от площади поверхности образцов из расчета $30...50 \text{ см}^3$ раствора на 1 см^2 покрытия.

Образцы 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. Раствор меняли после полного цикла испытаний одной партии образцов. Уровень раствора в ванне контролировали четыре раза в сутки путем добавления готового 3%-го раствора хлористого натрия.

Коррозионную стойкость образцов оценивали по потере массы после удаления продуктов коррозии. Для этого образцы после испытаний помещали в ванну с 10 %-м раствором гидроксида натрия (NaOH), ч.д.а., ГОСТ Р 55064–2012 [52], в котором они находились в течение 30 мин при температуре 20°C .

3.8 Методика стендовых испытаний

Для оценки предлагаемой технологии восстановления золотниковой пары гидрораспределителей Р160 нанокмпозиционным электролитическим железнением и сравнения ее с существующей технологией, применяли методы ускоренных лабораторных испытаний, позволяющие за небольшой промежуток времени и при небольших материальных затратах получить необходимые результаты.

Эффективность разработанной технологии восстановления и упрочнения определяли путем сравнения величины утечек, возникающих в гидрораспределителях, золотниковые пары которых восстанавливали по предлагаемой технологии (рисунок 3.18), с величиной утечек, возникающих в гидрораспределителях, золотниковые пары которых восстанавливали по существующей технологии (классическим электролитическим железнением). Для объективности оценки разработанной техно-

логии, полученные результаты сравнивали с величинами утечек золотниковых пар новых гидрораспределителей, серийно выпускаемых заводом-изготовителем.

Испытаниям подвергали два серийных гидрораспределителя, два гидрораспределителя, золотниковые пары которых были восстановлены по существующей технологии, и два гидрораспределителя, золотниковые пары которых восстанавливали по предлагаемой технологии с применением НКЭП на основе железа.

Перед началом испытаний гидрораспределители регулировали и проверяли в соответствии ГОСТ 20245–74 [35] на стенде КИ-4815М (рисунок 3.19).

Ускоренные испытания каждого распределителя проводили с применением искусственного загрязнителя рабочей жидкости, в качестве которого был использован кварцевый порошок марки 1К₁О₁01 ГОСТ 2138–91 [37] (средний диаметр фракции 0,008...0,012 мм) при концентрации 0,08 % по массе рабочей жидкости.



Рисунок 3.18 – Гидрораспределители Р160 3/1-222, восстановленные по предлагаемой технологии с использованием НКЭП на основе железа



Рисунок 3.19 – Стенд КИ-4815М для испытаний гидрораспределителей

При испытании гидрораспределителей на стенд устанавливали насос производительностью $12 \cdot 10^4 \text{ см}^3/\text{мин}$. В качестве рабочей жидкости применяли моторное масло М10Г2 температурой $50 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для проведения ускоренных испытаний использовали приспособление для имитации работы золотниковой пары (рисунок 3.20), позволяющее переключать золотник из положения «подъем» в положение «опускание» с определенной периодичностью.

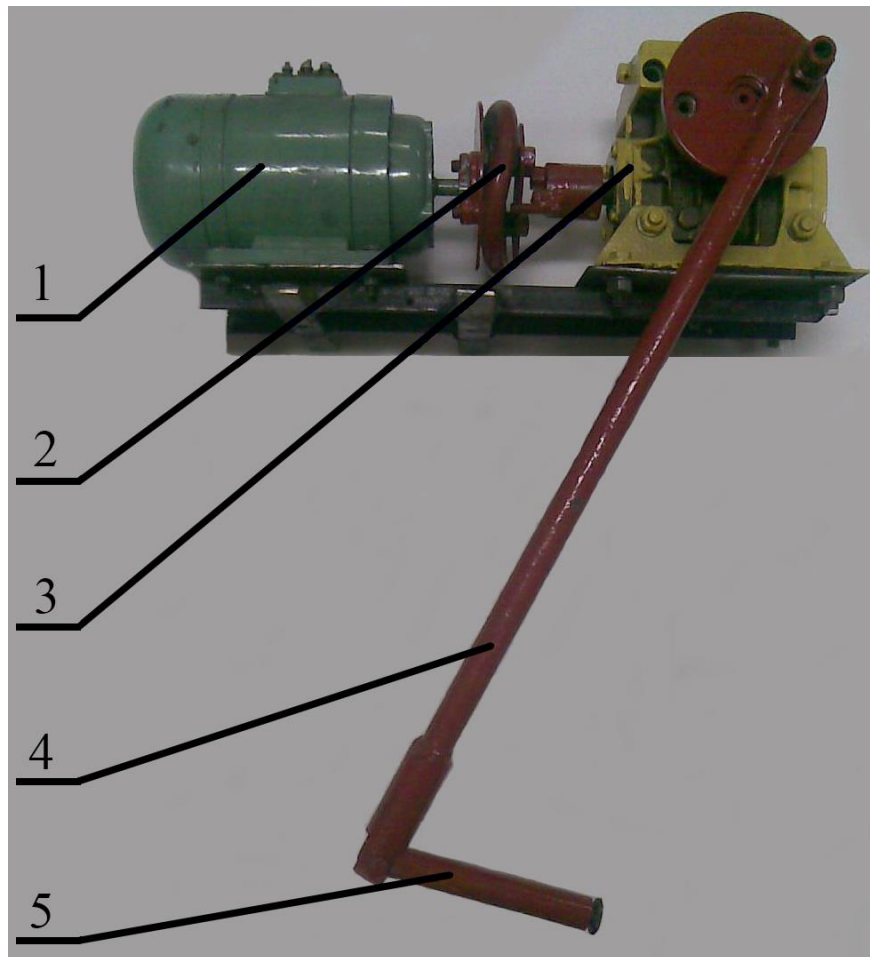


Рисунок 3.20 – Приспособление для имитации работы гидрораспределителя: 1 – электродвигатель; 2 – упругая муфта; 3 – червячный редуктор; 4 – шатун; 5 – удлинитель

Продолжительность испытаний каждого золотника составила 40 ч. Схема подключения гидрораспределителя для стендовых испытаний представлена на рисунке 3.21.

Испытания проводили в два этапа. Первый этап заключался в приработке каждого золотника (давление 16 МПа, масло без загрязнителя, продолжительность 8 ч). Второй этап проводили при основных режимах работы (давление 16 МПа, масло, загрязненное абразивом, продолжительность 32 ч).

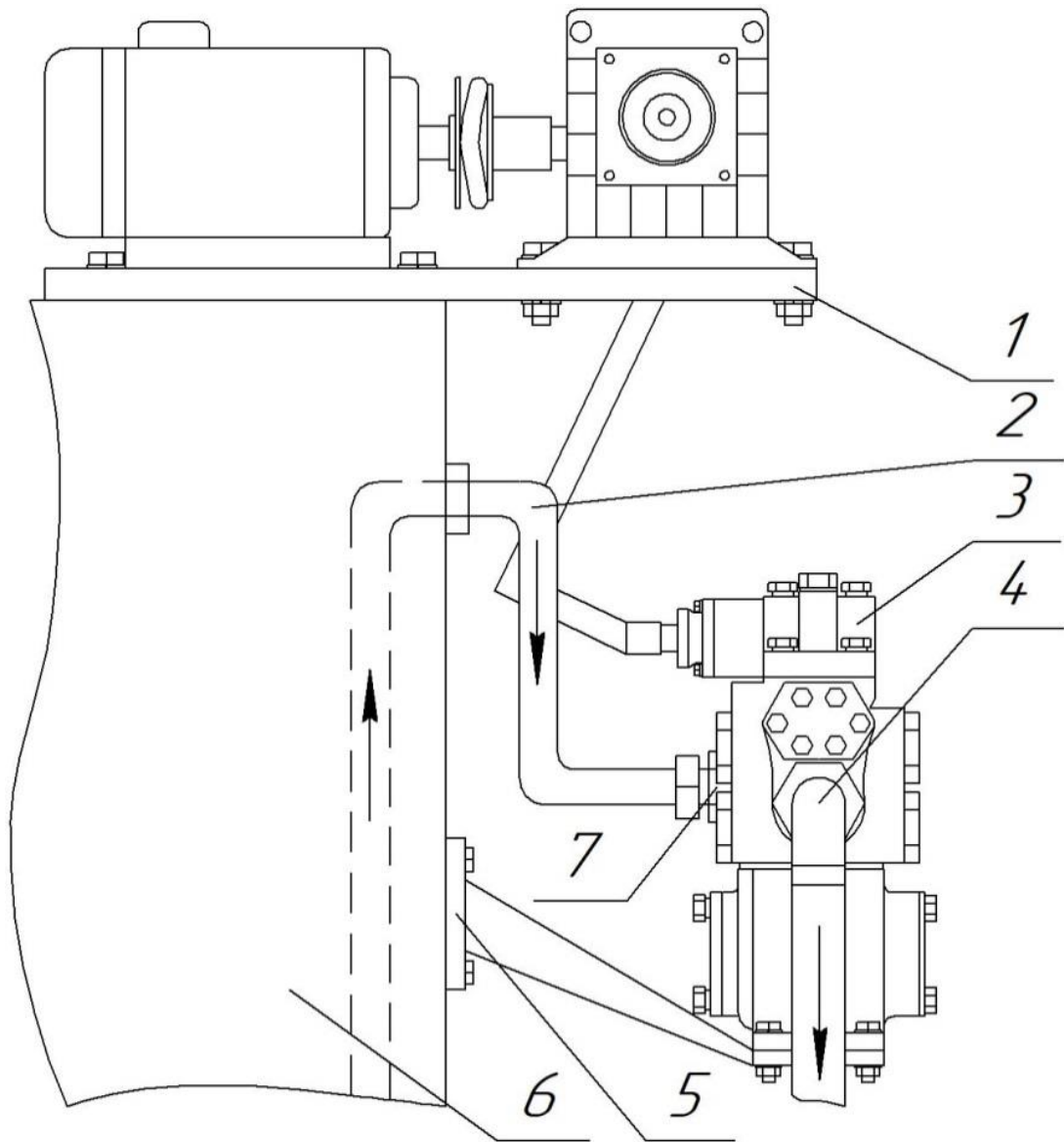


Рисунок 3.21 – Схема проведения лабораторных испытаний гидрораспределителя P160 3/1-222 на стенде КИ-4815М: 1 – приспособление для имитации работы гидрораспределителя; 2 – нагнетательный маслопровод; 3 – гидрораспределитель; 4 – сливной маслопровод; 5 – опора крепления; 6 – стенд КИ-4815М; 7 – канал для подключения гидрораспределителя к рабочему насосу

Золотниковые пары проверяли на герметичность по утечкам каждые 8 ч испытаний с помощью средств контроля КИ-28084М (рисунок 3.22). Для этого к гидрораспределителю подключали откалиброванный при температуре 50 ± 5 °С и давлении 16 МПа дроссель-расходомер КИ-1097-1: входной канал дросселя подсоединяли к напорному каналу 4 проверяемой золотниковой пары, а выходной канал – к ее сливному каналу 5.

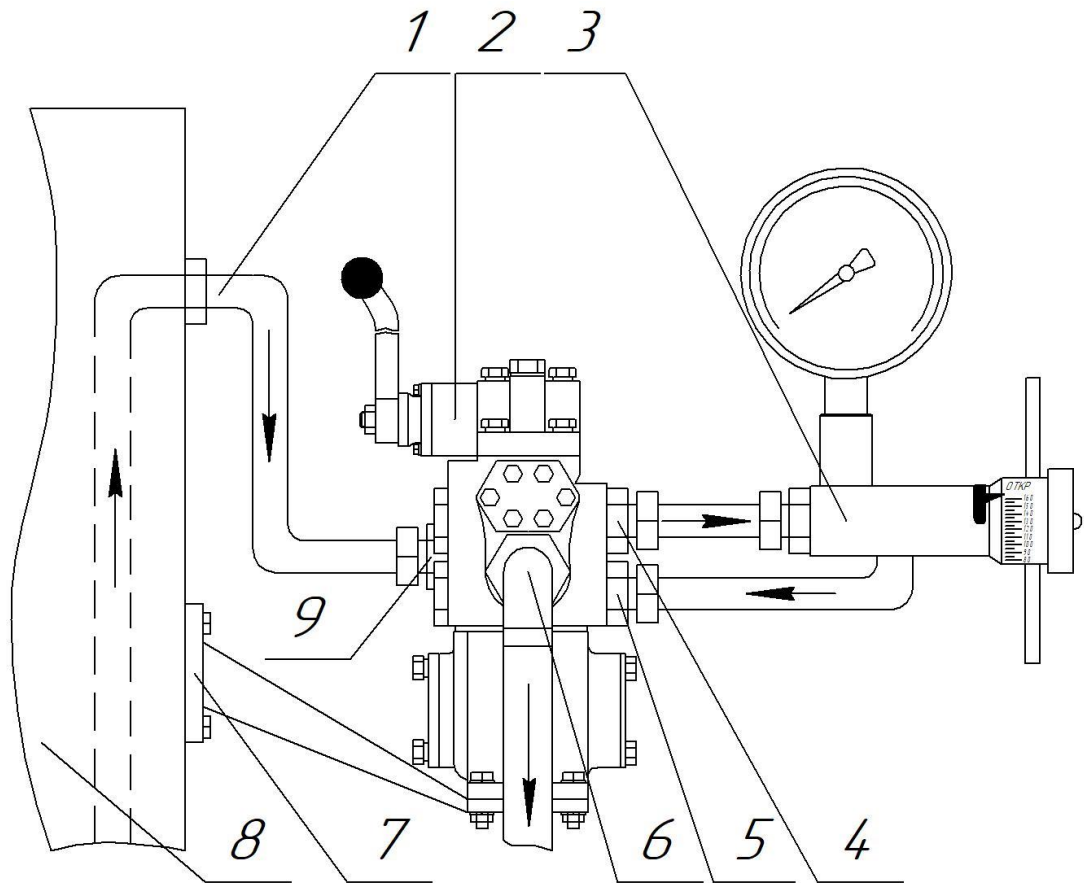


Рисунок 3.22 – Схема для замера утечек гидрораспределителя Р160 3/1-222 на стенде КИ-4815М: 1 – нагнетательный маслопровод; 2 – гидрораспределитель; 3 – дроссель-расходомер КИ-1097-1; 4 – напорный канал золотниковой пары; 5 – обратный канал золотниковой пары; 6 – сливной маслопровод; 7 – опора крепления гидрораспределителя на установочной плите стенда; 8 – стенд КИ-4815М; 9 – канал для подключения гидрораспределителя к рабочему насосу

В системе стенда создавали давление 16 МПа, золотник переводили в положение «подъем», вращением рукоятки дросселя устанавливали давление также равное 16 МПа и отслеживали показания на лимбе дросселя. Утечки в проверяемой золотниковой паре определяли как:

$$Y = Q_{\text{п.н.}} - Q_{\text{д}}, \quad (3.2)$$

где $Q_{\text{п.н.}}$ – измеренная производительность насоса при давлении в системе 16 МПа, см³/мин; $Q_{\text{д}}$ – расход гидравлической жидкости по показаниям дросселя-расходомера, см³/мин. Для исключения случайной ошибки измерения утечек в золотниковой паре все замеры проводили троекратно, а результат определяли как среднее арифметическое значение утечек трех измерений.

3.9 Методика эксплуатационных испытаний

Эксплуатационные сравнительные испытания проводили на тракторах К700А, 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, из которых два трактора были укомплектованы гидрораспределителями Р160 3/1-222 с золотниковыми парами, восстановленными по предлагаемой технологии НКЭП на основе железа, два трактора – гидрораспределителями, золотниковые пары которых были восстановлены по существующей технологии электролитическим железнением и два трактора – серийными гидрораспределителями.

Перед началом испытаний гидрораспределители регулировали и проверяли в соответствии ГОСТ 20245–74 [35] на стенде КИ-4815М.

Продолжительность испытаний каждого трактора варьировала в зависимости от хозяйства при соблюдении следующих условий:

- перед испытаниями во все тракторы было залито новое масло М10Г2 и промыты все фильтры гидравлической системы;
- все тракторы в пределах одного хозяйства выполняли одинаковые работы в приблизительно равных нагрузочных условиях;
- разница между суммарными наработками всех испытываемых тракторов в одном хозяйстве находилась в пределах 50 мото-ч.

В процессе эксплуатационных испытаний контролировали наработку тракторов и техническое состояние гидрораспределителей. Через каждые 100-150 мото-ч проверяли величину утечек в золотниковых парах гидрораспределителей по схеме, представленной на рисунке 3.23, с помощью комплекта средств КИ-28084М (рисунок 3.24). Для проверки утечек в золотниковых парах гидрораспределителя входной канал дросселя-расходомера КИ-1097-1 3 присоединяли к выходному каналу распределителя 4, а выходную магистраль – к входному каналу 5. При таком подключении через канал слива 6 утечки в проверяемой золотниковой паре уходят в гидробак, а из дросселя-расходомера сливается основной задросселированный поток гидравлической жидкости.

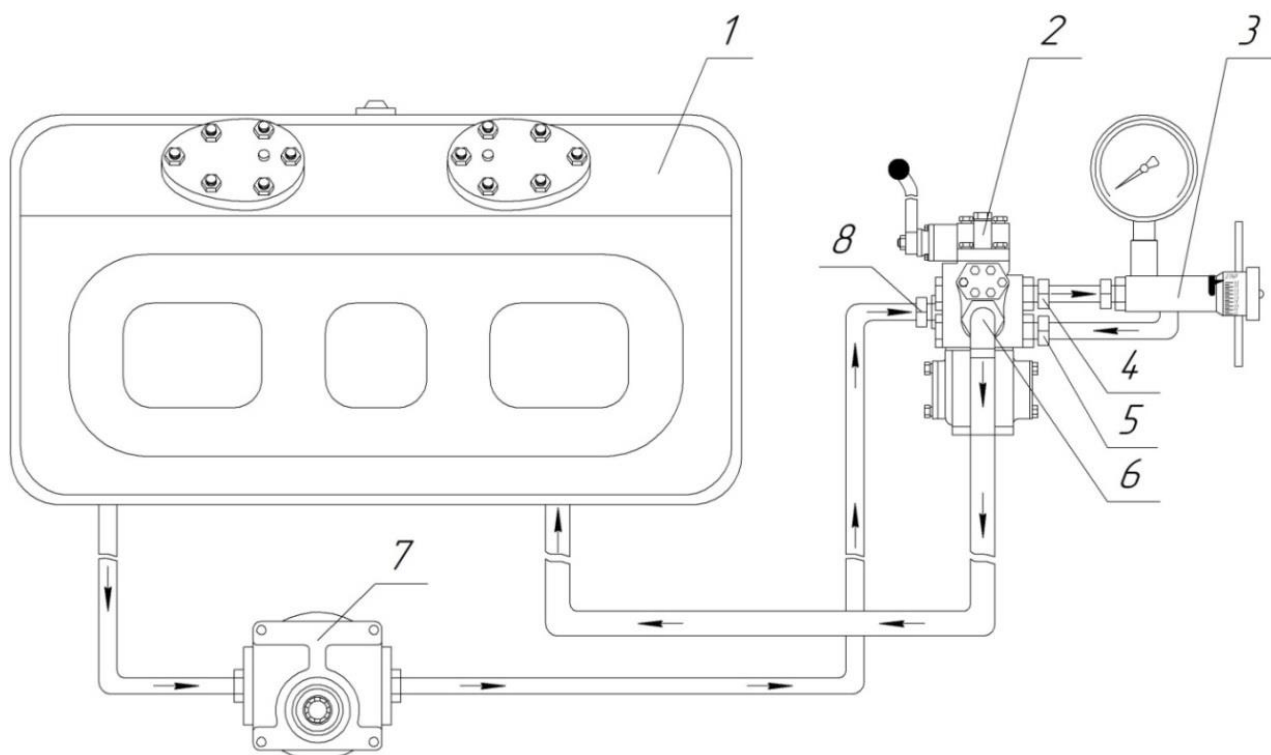


Рисунок 3.23 – Схема для замера утечек при проведении эксплуатационных испытаний гидрораспределителей Р160 3/1-222, установленных на тракторы К-700А: 1 – гидробак 700А.46.14.000; 2 – гидрораспределитель; 3 – дроссель-расходомер КИ-1097-1; 4 – выходной канал гидрораспределителя; 5 – входной канал гидрораспределителя; 6 – канал слива гидравлической жидкости в бак стенда; 7 – насос НШ-100А-3Л; 8 – канал для подключения гидрораспределителя к рабочему насосу



Рисунок 3.24 – Комплект средств диагностирования гидравлических систем КИ 28084М

Рукоятку дроссель-расходомера устанавливали в положение «открыто» и запускали дизель (частота вращения коленчатого вала – 950 мин^{-1}). Рычаг проверяемого золотника гидрораспределителя устанавливали в положение «подъем».

Далее, вращая рукоятку дросселя-расходомера, создавали давление 10 МПа и по показаниям шкалы на лимбе дросселя определяли расход гидравлической жидкости при наличии давления в гидрораспределителе.

Полученный расход переводили в приведенный расход $Q_{\text{пр}}$ по формуле:

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{изм}} \frac{n_{\text{н}}}{n_{\text{изм}}}, \quad (3.3)$$

где $Q_{\text{изм}}$ – измеренная подача насоса, $\text{см}^3/\text{мин}$; $n_{\text{изм}}$ – измеренная частота вращения коленчатого вала дизеля, мин^{-1} ; $n_{\text{н}}$ – частота вращения коленчатого вала дизеля, соответствующая его номинальному режиму, мин^{-1} (для К-700А $n_{\text{н}} = 1700 \text{ мин}^{-1}$).

Утечки в проверяемой золотниковой паре определяли по формуле:

$$Y = Q_{\text{п.н.}} - Q_{\text{пр.}} \quad (3.4)$$

Для трактора К-700А $Q_{\text{п.н.}} = 144 \cdot 10^3 \text{ см}^3/\text{мин}$.

Для исключения случайной ошибки измерения утечек в золотниковой паре все замеры проводили троекратно, а итоговое значение измеряемой величины определяли как среднее арифметическое значений утечек трех измерений.

3.10 Обработка экспериментальных данных и оценка точности измерений

Для определения минимального числа объектов наблюдения при проведении испытаний применяют несколько методов [96, 111]. Они сводятся к нахождению величины среднеквадратичного отклонения α и среднего арифметического значения $a_{\text{ср.ар.}}$ при заданном необходимом коэффициенте вариации V . Задаваясь значениями необходимой относительной точности эксперимента ε , вычисляли число объектов наблюдения по зависимости:

$$n = \frac{t^2 V^2}{\varepsilon^2}, \quad (3.5)$$

где t – нормативная точность; T – погрешность измерения.

При надежности опыта, равной 0,9, и коэффициенте вариации V , не превышающем 10 %, минимальное количество опытных золотников [96]:

$$n = \frac{t^2 V^2}{\varepsilon^2} = \frac{1,65^2 \cdot 0,1^2}{0,07^2} = 5,56 \text{ шт.} \quad (3.6)$$

Учитывая, что каждый гидрораспределитель комплектуют двумя золотниками, опытная партия должна быть кратна 3; количество экспериментальных золотников – 6.

Результаты обрабатывали по способу наименьших квадратов [111]:

$$a_{\text{ср.ар.}} = \frac{\sum_{k=1}^N X_k}{N}, \quad (3.7)$$

где X_k – случайный результат при N измерений; N – количество измерений.

Для того, чтобы учесть возможные отклонения $a_{\text{ср.ар.}}$, вычисляли среднюю квадратичную ошибку, которая является вероятностной характеристикой совокупности возможных средних арифметических значений из N числа измерений:

$$D(\bar{a}) = \frac{\alpha^2}{N}, \quad (3.8)$$

где $D(\bar{a})$ – средняя квадратичная ошибка среднего арифметического значения.

Тогда с учетом (3.8) можно определить значение среднеквадратичного отклонения искомых величин по следующей зависимости:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (X_k - \bar{a})^2}{n - 1}}. \quad (3.9)$$

Среднеквадратичное отклонение определяемых величин является числовой характеристикой качества всех измерений, для которых оно задано или вычислено. Чем больше среднеквадратичное отклонение одного измерения, тем хуже качество всех измерений. Для оценки качества измерений пользовались:

а) вероятностной ошибкой:

$$\tau = \frac{2}{3} \alpha. \quad (3.10)$$

б) абсолютной ошибкой:

$$m \approx 0,86 \alpha. \quad (3.11)$$

в) мерой точности:

$$p = \frac{0,7}{\alpha}. \quad (3.12)$$

Чем хуже качество измерений, тем больше итоговые значения вероятностной и абсолютной ошибок и тем меньше мера точности определяемых величин [96]. Последовательность и результаты этих расчетов приведены в приложениях В, Г, Д.

3.11 Выводы по разделу

1. Анализ литературных данных, а так же результаты проведенных исследований показали, что для получения качественных нанокomпозиционных электролитических покрытий на основе железа целесообразно использовать горячий хлористый электролит.

2. Патентный поиск в области методов создания наноразмерных порошков позволил выбрать метод плазменной перегонки, при котором частицы порошка приобретают необходимые физико-механические и химические свойства, а так же предпочтительные размеры и форму.

3. Исходя из свойств наноразмерных порошков, на основании литературных данных и предварительных лабораторных испытаний для получения нанокomпозиционных электролитических покрытий были выбраны следующие виды наноразмерных порошков в концентрациях 1, 3, 5 г/л: карбид вольфрама (WC), оксид алюминия (Al_2O_3), карбид титана (TiC), карбид кремния (SiC) и нитрид алюминия (AlN).

4. Для проведения исследований была разработана установка для получения нанокomпозиционных электролитических покрытий и разработана оригинальная методика получения покрытий и приготовления электролита. На разработанный состав электролита получен патент на изобретение РФ (приложение Е).

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Результаты исследования влияния наноразмерных твердых частиц на микротвердость электролитического покрытия железа

Для определения влияния вида и концентрации наноразмерного материала на микротвердость получаемого электролитического покрытия на основе железа были получены образцы с выбранной группой НРП по методике, описанной в третьей главе. Внешний вид металлографических шлифов после исследования представлен на рисунке 4.1.

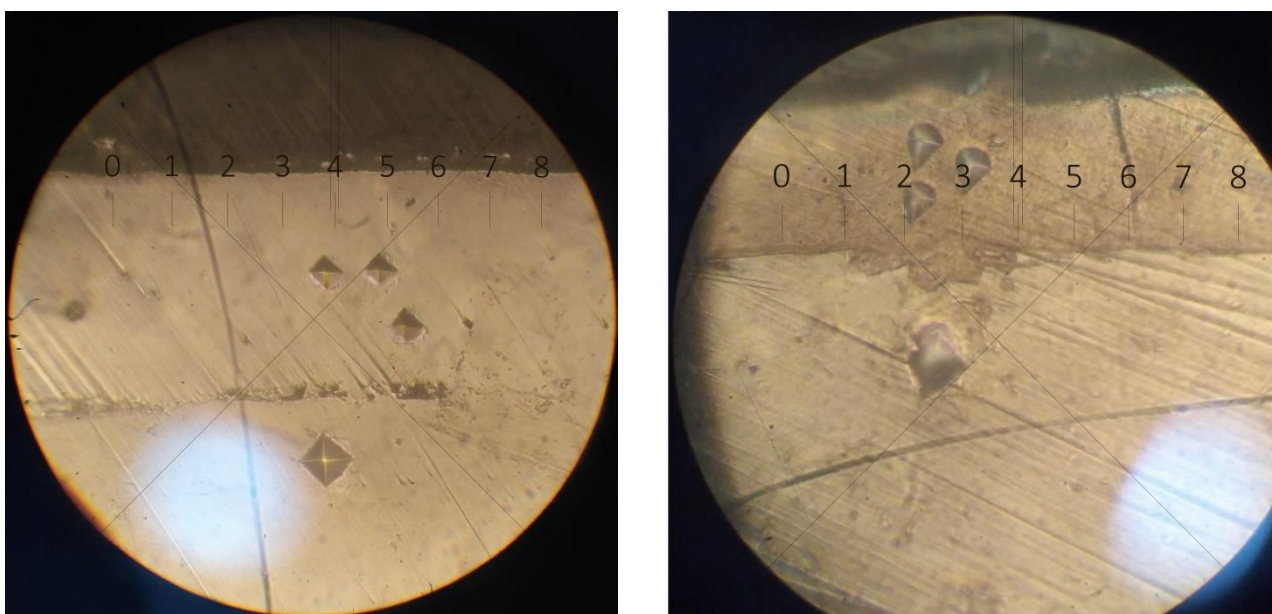


Рисунок 4.1 – Шлифы образцов с нанокomпозиционным покрытием после измерения микротвердости

Результаты измерения микротвердости представлены на рисунке 4.2.

Как видно из представленных данных, наибольшей микротвердостью в 682 HV обладают покрытия, нанесенные из электролита железнения с концентрацией наноразмерных частиц нитрида алюминия 3 г/л.

Высокая микротвердость электролитических покрытий с включением частиц нитрида алюминия, по сравнению с другими наноразмерными частицами, объясняется, скорее всего, не только их высокой твердостью, но и химическими свойствами нитридов. Они, при взаимодействии с кислотами, присутствующими в

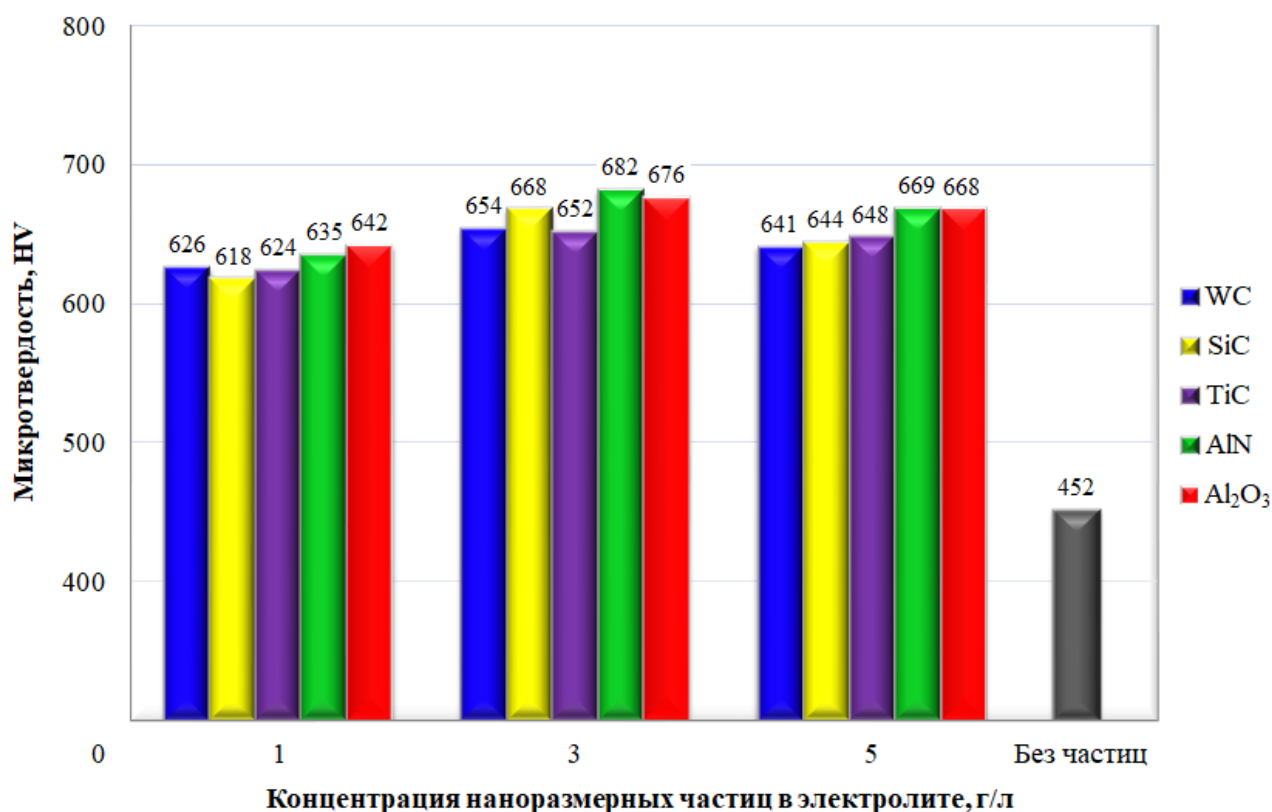


Рисунок 4.2 – Гистограмма микротвердости НКЭП в зависимости от вида и концентрации наноразмерных частиц в электролите

электролите железнения, выделяют азот, внедрение которого в электролитическое покрытие дополнительно улучшает его физико-механические свойства [17].

Сравнение теоретических значений микротвердости, полученных по формуле (2.18), и экспериментальных, представлено в таблице 4.1. Расхождение теоретических значений микротвердости с экспериментальными данными не превышает 15 %, что свидетельствует о высокой степени достоверности предполагаемых теоретических исследований и справедливости теоретической зависимости (2.18).

В результате исследования микротвердости покрытий были определены наиболее перспективный материал и его концентрация, которые позволили достичь наибольшей микротвердости покрытия по сравнению с другими рассматриваемыми материалами, в связи с чем все последующие эксперименты проводили только с нанодисперсным порошком нитрида алюминия.

Таблица 4.1 – Сравнение теоретической и экспериментальной микротвердости нанокпозиционных электролитических покрытий на основе железа

Материал НПП	Концентрация, г/л	Теоретическая микротвердость HV	Экспериментальная микротвердость HV	Расхождение, %
WC	1	677	626	8,15
	3	711	654	8,72
	5	719	641	12,17
SiC	1	691	618	11,81
	3	733	668	9,73
	5	740	644	14,9
TiC	1	685	624	9,78
	3	725	652	11,2
	5	733	648	13,12
AlN	1	701	635	10,39
	3	750	682	9,97
	5	758	669	13,3
Al ₂ O ₃	1	720	642	12,15
	3	759	676	12,28
	5	766	668	14,67
Без НПП	—	—	452	—

4.2 Результаты определения наиболее эффективных режимов нанесения покрытия и концентрации наноразмерных частиц

Определение заданных режимов нанесения и концентрации НРЧ для получения НКЭП на основе железа с повышенными физико-механическими свойствами проводили с применением метода математическое планирование эксперимента, описанным во второй главе. Характеристики проведения эксперимента представлены в таблице 4.2. План эксперимента удобно записать в виде таблицы, называемой репликой планирования (таблица 4.3).

Таблица 4.2 – Характеристики проведения экспериментов установления режимов нанесения покрытия

Характеристика плана	Стандартный масштаб	Натуральный масштаб		
		x_1	x_2	x_3
Нулевой уровень	0	3	70	20
Верхний уровень	1	5	80	25
Нижний уровень	–1	1	60	15
Интервал варьирования		2	10	5
Звездные точки	1,682	6,364	86,82	28,41
	–1,682	0	53,18	11,59

В результате проведения расчетов были получены уравнения, описывающие факторы, влияющие на процесс нанесения покрытия с кодированными (4.1) и с физическими переменными (4.2):

$$y_i^p = 713 + 40X_1 + 22X_3 - 78X_1^2 - 58X_2^2 - 47X_3^2, \quad (4.1)$$

$$y_i^{pn} = -3204,5 + 137x_1 + 81,2x_2 + 79,6x_3 - 19,5x_1^2 - 0,58x_2^2 - 1,88x_3^2. \quad (4.2)$$

После проверки полученных уравнений на адекватность с помощью критерия Фишера было установлено, что уравнения адекватно описывают поверхности отклика, так как выполняется условие $F_p \leq F$ ($4,95 \leq 5,41$). Для наглядности и анализа исследуемых процессов уравнение регрессии представили графически в виде

Таблица 4.3 – Реплика планирования эксперимента

j	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	y_j^3	y_j^p
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	482	468
2	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	567	549
3	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	473	468
4	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	560	549
5	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	512	512
6	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	593	593
7	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	531	512
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	616	593
9	1	-1,682	0	0	2,829	0	0	0	0	0	428	425
10	1	1,682	0	0	2,829	0	0	0	0	0	564	561
11	1	0	-1,682	0	0	2,829	0	0	0	0	568	548
12	1	0	1,682	0	0	2,829	0	0	0	0	540	548
13	1	0	0	-1,682	0	0	2,829	0	0	0	547	544
14	1	0	0	1,682	0	0	2,829	0	0	0	629	618
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	691	713
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	653	713
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	655	713
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	685	713
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	698	713
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	710	713

поверхностей отклика (рисунок 4.3). При числе факторов, большем или равном трем, интерпретация функции отклика возможна при использовании двух факторов и фиксации остальных на поверхностных уровнях.

Из представленных данных видно, что максимальная микротвердость НКЭП на основе железа будет достигнута при температуре электролита 70 °С, плотности катодного тока 21 А/дм² и концентрации наноразмерных частиц в электролите 3,1 г/л, что соответствует микротвердости 717 HV. Все последующие исследования проводили с покрытиями, получаемыми при установленных режимах.

Нахождение максимумов выбранных факторов и построение поверхностей отклика производили с помощью программы для анализа данных STATISTICA.

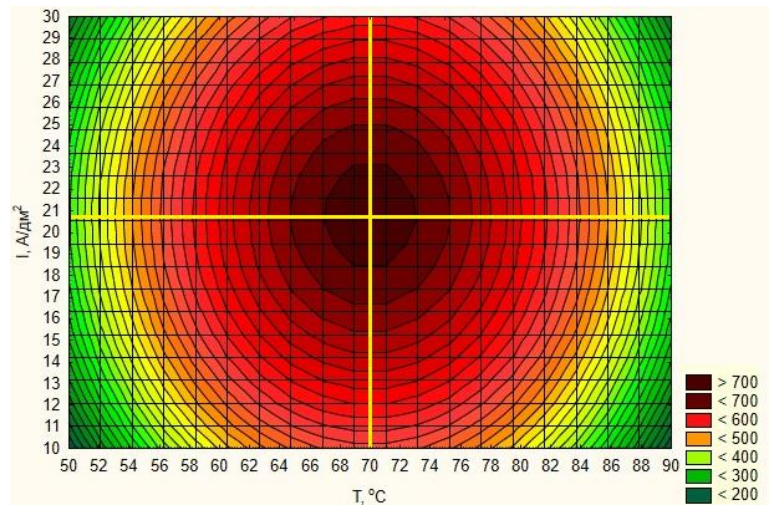
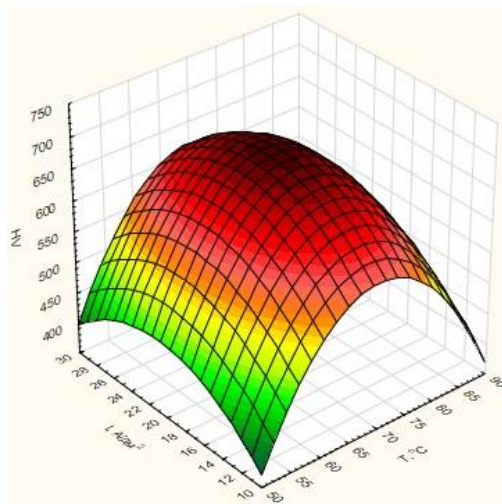
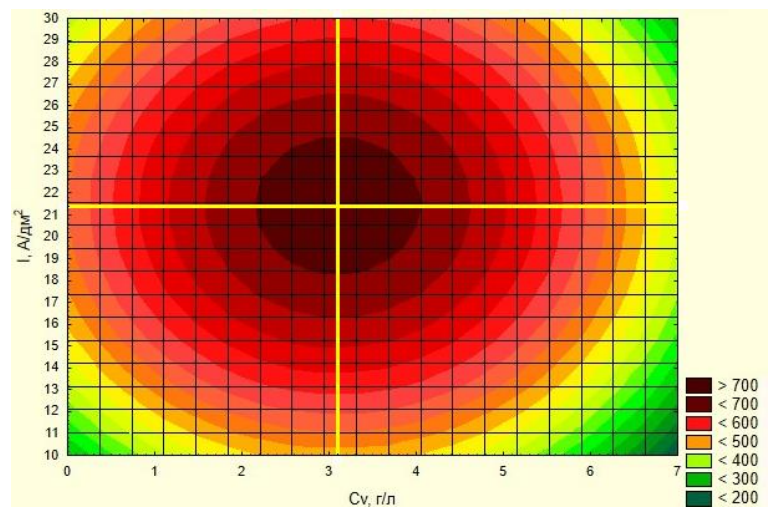
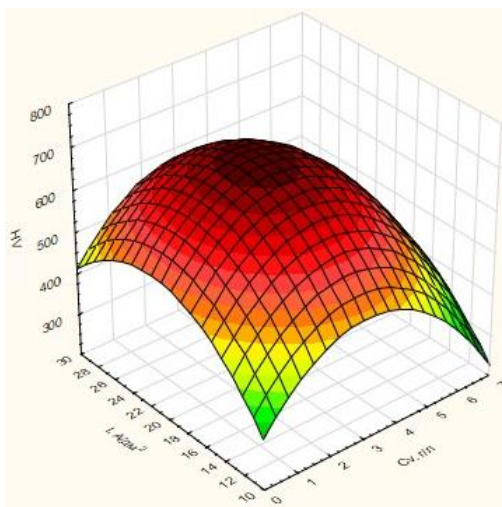
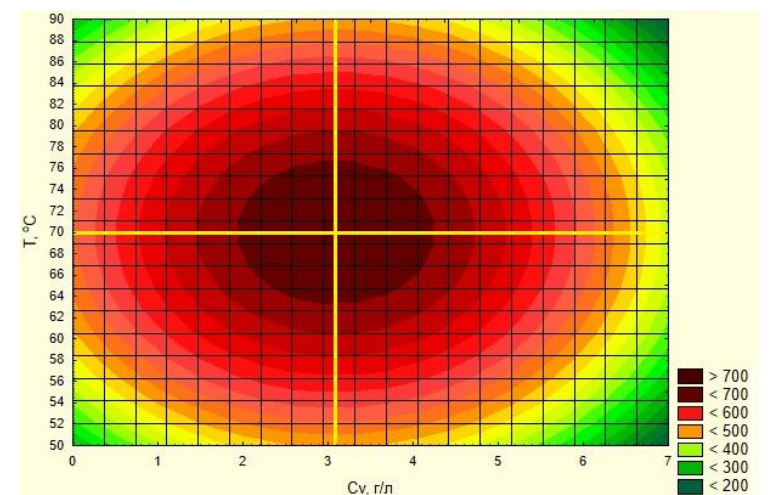
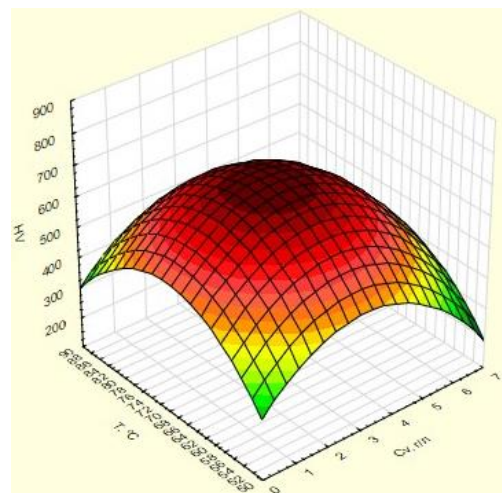
*a**б**в*

Рисунок 4.3 – Поверхности отклика влияния различных факторов на микротвердость НКЭП на основе железа: *a* – влияние факторов температуры электролита и плотности катодного тока; *б* – влияние факторов плотности катодного тока и концентрации наноразмерных частиц; *в* – влияние факторов температуры электролита и концентрации наноразмерных частиц

4.3 Результаты определение прочности сцепления покрытия с основным металлом

Прочность сцепления НКЭП на основе железа с материалом детали определяли по методике, описанной в третьей главе. Результаты испытаний представлены на рисунке 4.4.

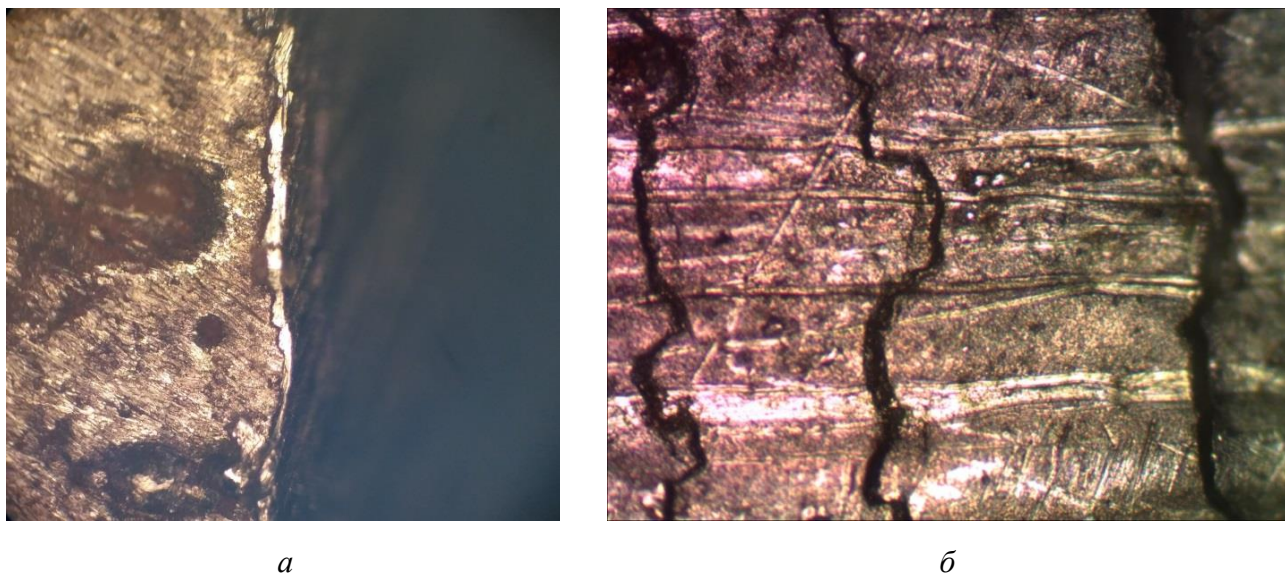


Рисунок 4.4 – Образцы после испытания на прочность сцепления:
а – метод опиловки (увеличение $\times 50$); б – метод изгиба (увеличение $\times 50$)

Осмотр образцов под микроскопом после испытаний методом опиловки (см. рисунок 4.4, а) показал, что отслаивания от материала покрытия не произошло. При осмотре образцов под микроскопом после испытаний по методу изгиба (см. рисунок 4.4, б) отслаивания покрытия в месте излома также не наблюдалось. После проведения испытаний методом изменения температур при визуальном осмотре отмечено отсутствие вздутий, трещин и отслаиваний покрытия от металла.

Из вышеизложенного следует, что НКЭП на основе железа имеет высокую прочность сцепления с материалом детали и может быть использовано в ремонтном производстве.

4.4 Результаты исследования морфологии поверхности и химического состава покрытий

4.4.1 Результаты исследования морфологии поверхности покрытия

Морфология классического и НКЭП на основе железа представлена на рисунке 4.5.

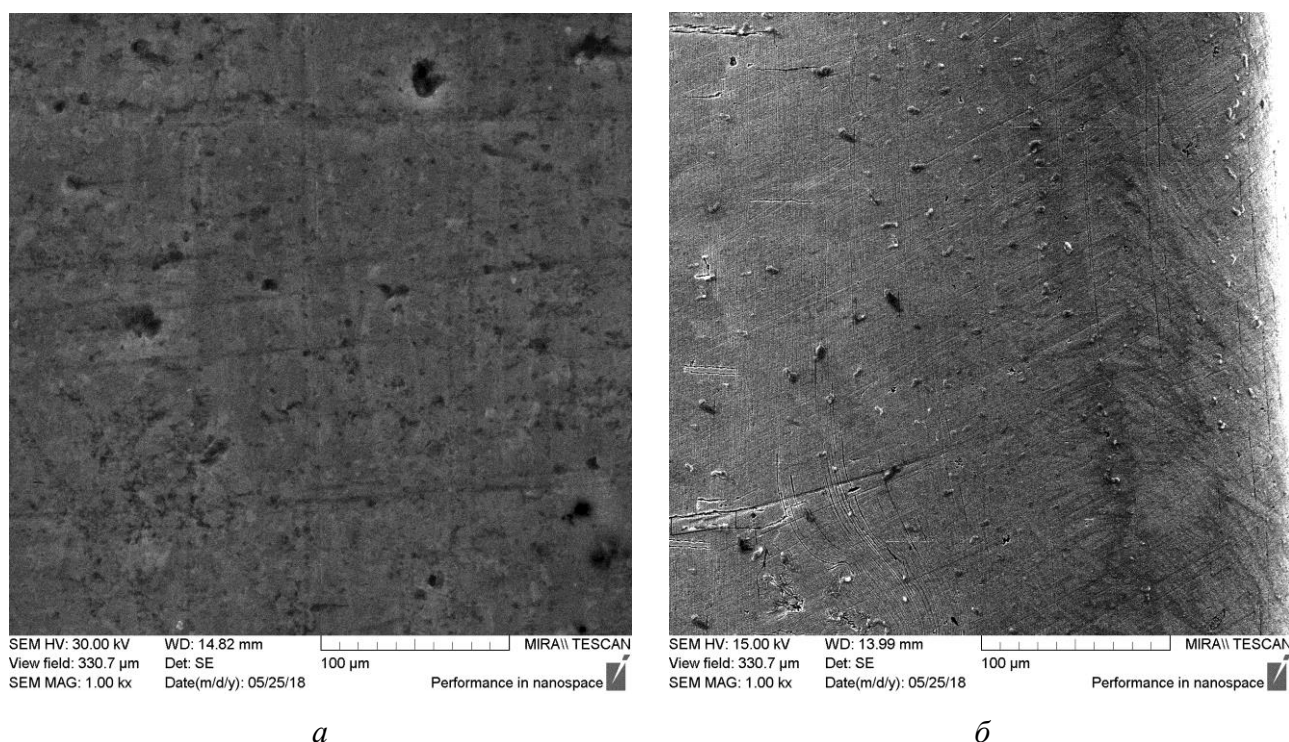


Рисунок 4.5 – Морфология электролитических покрытий на основе железа (увеличение $\times 1000$): а – классическое; б – нанокomпозиционное

Как видно из рисунка 4.5, внешний вид покрытий имеет некоторые различия. В классическом покрытии на поверхности какие-либо включения отсутствуют (см. рисунок 4.5, а). Нанокomпозиционное покрытие имеет на всей поверхности различные включения, свидетельствующие о соосаждении наноразмерных частиц (см. рисунок 4.5, б).

4.4.2 Результаты исследования химического состава покрытий

Для подтверждения предположения о внедрения наноразмерных частиц нитрида алюминия в электролитическое покрытие и определения его количественного соотношения был проведен лазерный эмиссионный спектральный анализ.

В результате проведенного анализа были получены спектрограммы классического покрытия и НКЭП на основе железа (рисунок 4.6), по которым было рассчитано процентное содержание основных элементов (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Содержание основных химических элементов в электролитическом покрытии

В массовых процентах

Элемент	Содержание элемента в покрытии	
	классическом	нанокомпозиционном
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 мас. %

Как видно из представленных данных, в НКЭП, помимо железа, углерода и хлора, содержатся алюминий (1,26 мас. %) и азот (0,95 мас. %), что подтверждается наличием соответствующих пиков на спектрограмме (см. рисунок 4.6, б). Это является подтверждением предположения о внедрение наноразмерных частиц нитрида алюминия в покрытие.

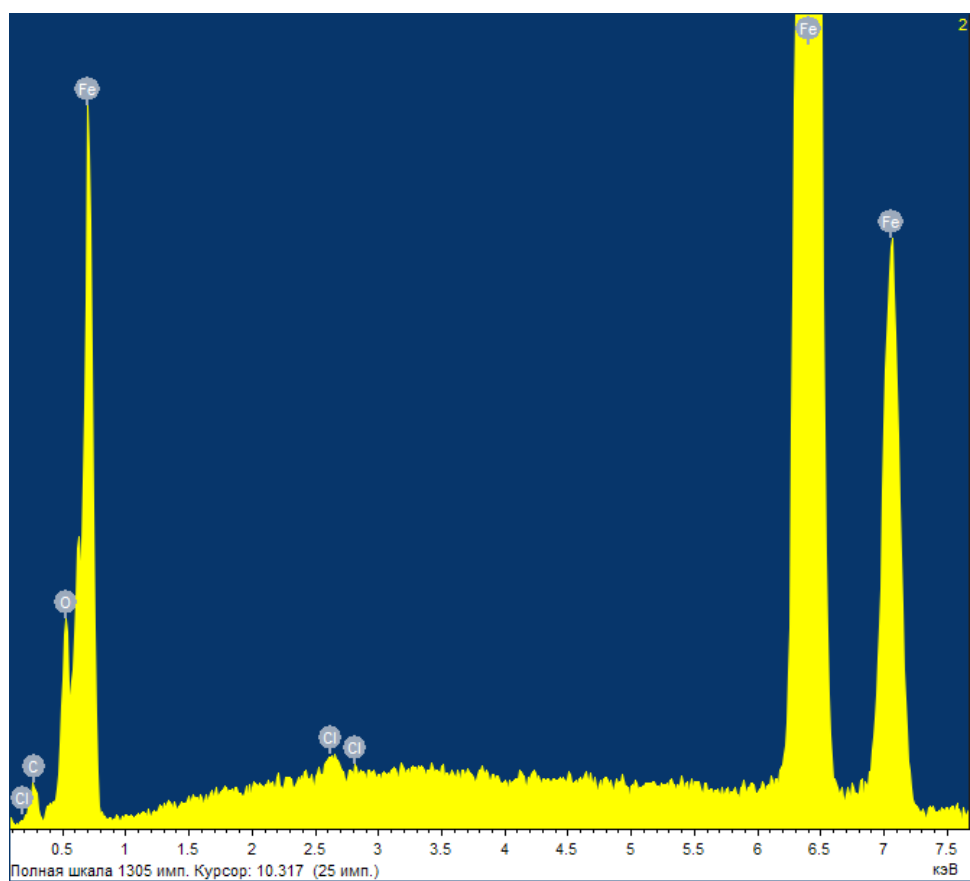
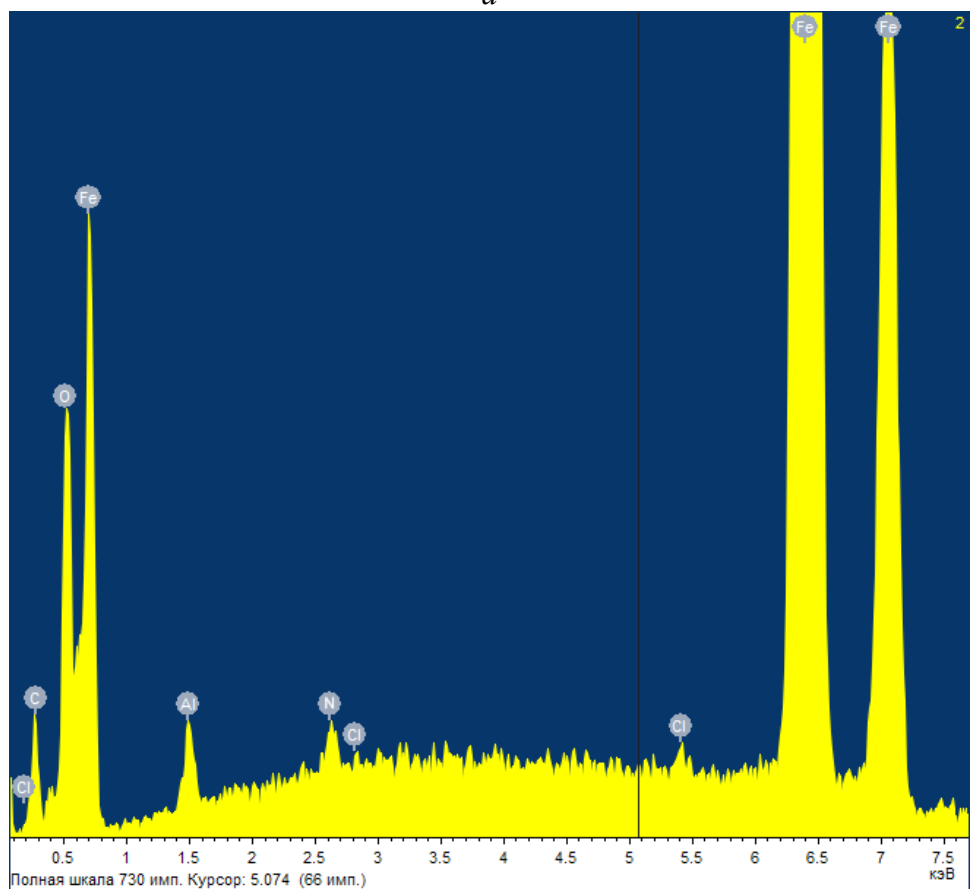
*a**б*

Рисунок 4.6 – Спектрограммы электролитического покрытия на основе железа:

a – классическое; *б* – наноконпозиционное

4.5 Результаты ускоренных сравнительных трибологических испытаний

Ускоренные сравнительные трибологические испытания проводили в соответствии с методикой, описанной в третьей главе. Испытаниям подвергали образцы без покрытия (материал серийного золотника), с классическим электролитическим покрытием (восстановление по существующей технологии) и НКЭП на основе железа (восстановление и упрочнение по предлагаемой технологии). Результаты испытаний представлены на рисунках 4.7 и 4.8, а внешний вид пар трения до и после испытаний представлен на рисунке 4.9.

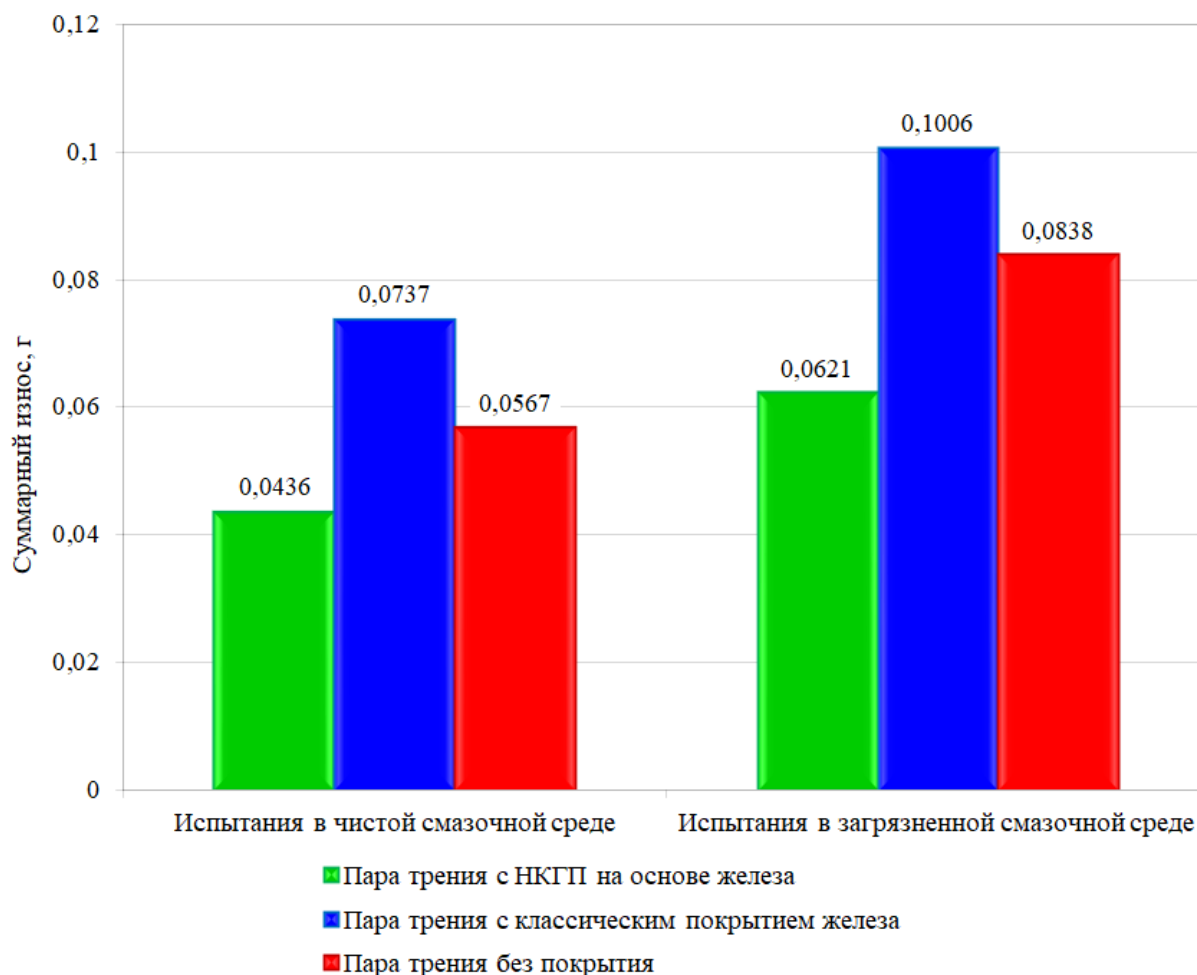


Рисунок 4.7 – Суммарный износ по массе пар трения после ускоренных сравнительных трибологических испытаний

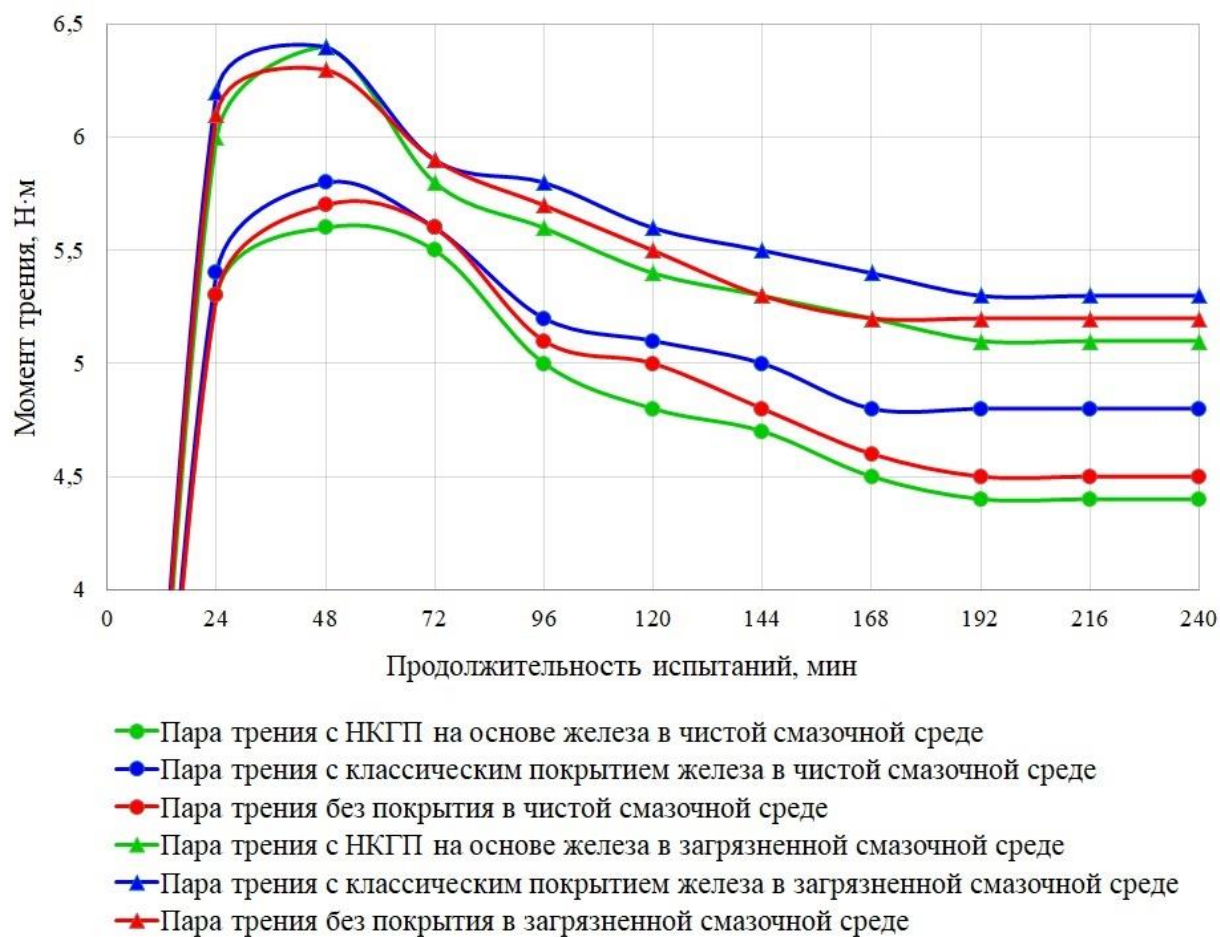


Рисунок 4.8 – Изменение момента трения в течение ускоренных сравнительных трибологических испытаний



а



б

Рисунок 4.9 – Внешний вид пар трения для ускоренных сравнительных трибологических испытаний: *а* – до испытаний; *б* – после испытаний

Из рисунка 4.7 видно, 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 среде.

При испытаниях 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, и в 1,35 раза меньше, чем у пары трения из стали 15X без покрытия.

В течение ускоренных сравнительных трибологических испытаний было зафиксировано также изменение момента трения (см. рисунок 4.8). Так, у образцов с НКЭП на основе железа в чистой смазочной среде момент трения к концу испытаний достиг значения 4,4 Н·м, что на 9% ниже, чем у образцов с классическим покрытием железа, и на 2 % ниже, чем у образцов из стали 15X без покрытия. В загрязненной смазочной среде у образцов с НКЭП на основе железа момент трения составил 5,1 Н·м, что на 4 % меньше, чем у образцов с классическим покрытием, и 2 % меньше, чем у образцов из стали 15X без покрытия.

Из вышеизложенного следует, что НКЭП на основе железа по сравнению с классическим железнением и сталью 15X обладает повышенной износостойкостью.

4.6 Результаты коррозионных испытаний

Значительное влияние на степень изнашивания золотниковой пары оказывает коррозия, воздействие которой на поверхность трения выражается в виде снижения прочности, твердости и пластичности, что в свою очередь приводит к разрушению поверхностных слоев золотниковой пары и ухудшает их антифрикционные свойства.

Результаты коррозионных испытаний проведенных по методике, описанной в третьей главе, представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты коррозионных испытаний

В граммах

Образец	Масса образца до испытаний	Масса образца после испытаний	Разность массы
С НКЭП на основе железа	29,12	28,59	0,53
С классическим железнением	27,64	26,77	0,87
Без покрытия	23,49	23,01	0,48

Анализируя представленные данные можно сделать вывод о том, что уменьшение массы образцов с НКЭП составило 0,53 г, что в 1,6 раза меньше, чем у образцов с классическим покрытием, однако в 1,1 раза больше, чем у образцов без покрытия. Это объясняется тем, что электролитическое покрытие наносится в агрессивной кислотной среде и некоторое количество соляной кислоты в виде соединений остается в нем. Однако при модификации электролитического железнения наноразмерными частицами значительно повышает его коррозионную стойкость, так как частицы нитрида алюминия электронейтральны и, включаясь в электролитическое покрытие, они будут создавать сопротивление протеканию электрического тока, который является причиной коррозионной активности в металлах.

4.7 Технология восстановления и упрочнения золотников гидрораспределителей типа P160

4.7.1 Требования, предъявляемые к золотникам при восстановлении и упрочнении

В первой главе рассмотрены требования к восстановлению золотниковых пар гидрораспределителей. Их необходимо соблюдать и при восстановлении и упрочнении предлагаемым способом. Помимо общих требований к золотниковым

парам необходимо учесть требования, предъявляемые при нанесении электролитических покрытий на золотник, а именно:

- механическая обработка золотников должна исключать перегрев, а также образование канавок и борозд на их поясках;
- поверхности золотников не должны иметь глубоких рисок, царапин и следов коррозии;
- технологические отверстия перед гальваническими операциями должны быть плотно закрытыми для исключения попадания агрессивных жидкостей внутрь золотника.

4.7.2 Рекомендации к нанесению нанокompозиционных электролитических покрытий на основе железа

Все материалы, применяемые при нанесении НКЭП на основе железа должны соответствовать заявленной чистоте и установленным на них стандартам.

Для повышения производительности и безопасности труда все восстанавливаемые и упрочняемые золотники подвешивают на специальные подвески, к которым предъявляют следующие требования:

- подвески изготавливают из материалов, имеющих высокую электропроводность;
- все участки подвески должны быть изолированы от контакта с электролитами и растворами;
- конструкция подвесок должна предусматривать надежное крепление деталей и обеспечивать подачу на них электрического тока.

Для предотвращения нанесения покрытия на участки, не подлежащие покрытию, их изолируют изоляционными химически стойкими лаками. После нанесения изоляции ее необходимо тщательно высушить в сушильном шкафу. Попадание изоляционных материалов на участки, подлежащие нанесению покрытия, не допускается.

Контроль гальванических ванн проводят ежемесячно перед началом работы, при нанесении покрытия более 100 дм² и при наличии брака (недостаточная толщина покрытия, неудовлетворительное качество, изменение цвета получаемого покрытия и т. д.).

Соотношение площади поверхности единовременного покрытия к объему электролита должно быть >1 .

После завершения восстановления и упрочнения золотника проводят его визуальный осмотр. Не допускаются вздутия покрытия, его сколы и отслаивание. Толщина покрытия должна быть в пределах допуска на последующую механическую обработку.

Некачественные покрытия удаляют шлифованием до полного снятия покрытия на бесцентрошлифовальных станках.

При нанесении НКЭП на основе железа необходимо, чтобы были соблюдены требования безопасности согласно ОСТ 1 90366–85 [101]. Технологический процесс нанесения НКЭП на основе железа с экологической точки зрения должен соответствовать условиям обычного железнения деталей.

4.7.3 Технология восстановления золотниковой пары с применением наноконпозиционного электролитического покрытия на основе железа

Схема технологического процесса восстановления золотниковых пар гидро-распределителя Р160 с применением НКЭП на основе железа представлена на рисунке 4.10. Согласно ей рассмотрим технологию восстановления и упрочнения, порядок проведения отдельных операций и рекомендации при их проведении.

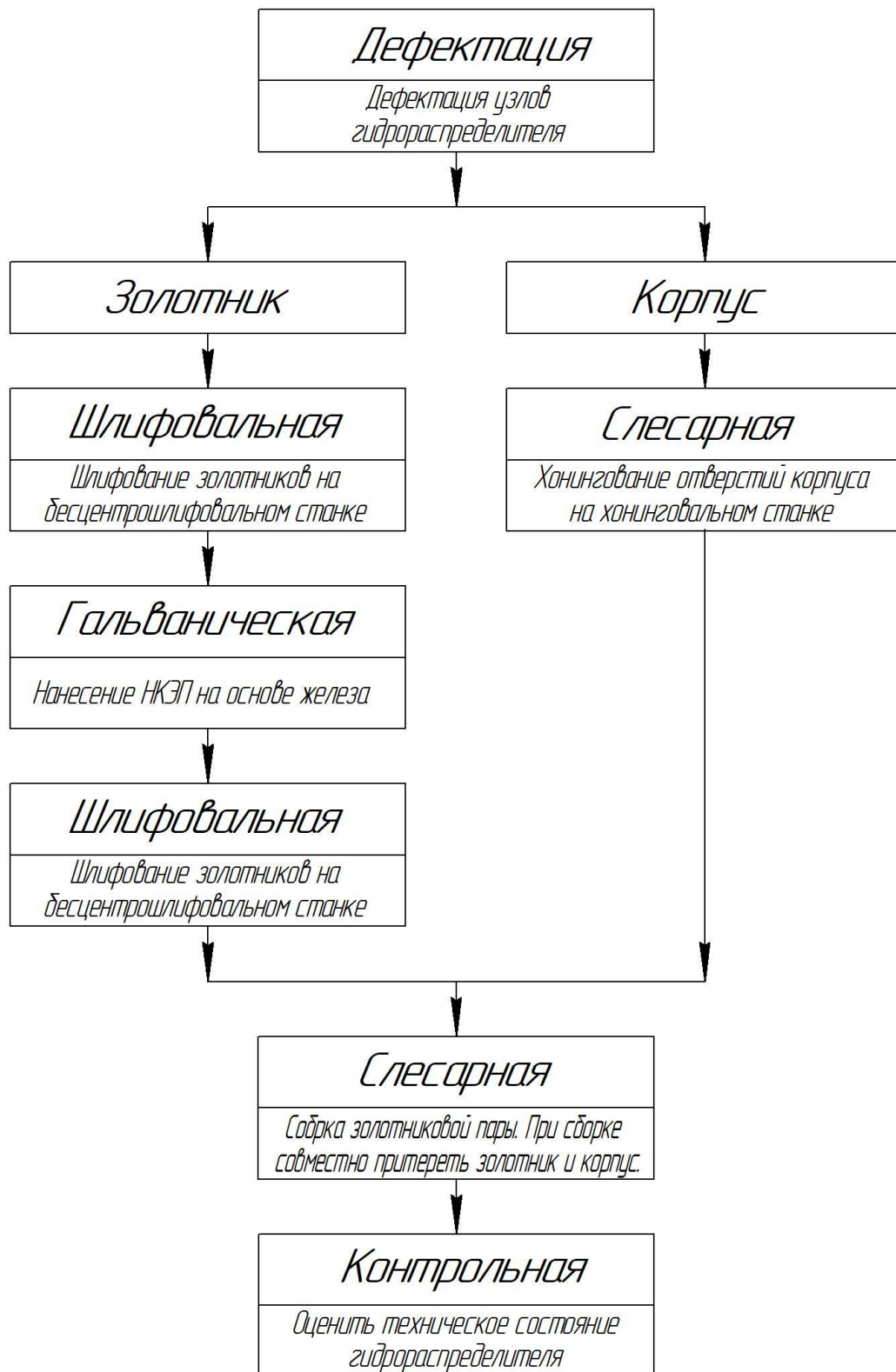


Рисунок 4.10 – Схема технологического процесса восстановления золотниковых пар гидрораспределителя Р160 3/1-222

При восстановлении золотниковых пар гидрораспределителей их обезличивают, проводят дефектацию и распределяют на группы по величине износа.

Пояски в отверстиях корпуса хонингуют до выведения следов износа на вертикально-хонинговальном станке 3К833 с применением бруска АСП-60/40 для чернового хонингования и бруска АСМ 20/14 для чистового хонингования. Для этого корпус гидрораспределителя закрепляют на столе станка специальными прижимами, соблюдая соосность хонинговального бруска и отверстия корпуса. Посредством механизма станка осуществляют одновременное возвратно-поступательное и вращательное движение хона и радиальную подачу брусков, обеспечивая равномерное увеличение диаметра поясков корпуса. Частота вращения шпинделя – 250 мин^{-1} . При проведении операций хонингования в рабочую зону подается СОЖ Oilcool 3000 UNI или аналогичная.

Контроль диаметров ведут с применением индикаторного нутромера НИ 25-50 ГОСТ 868-82, лупы $\times 5$ ГОСТ 25706-83, образцов шероховатости ГОСТ 9378-93. Значения отклонений геометрической формы не должно превышать 0,004 мм.

После обработки корпуса промывают в моечной машине ОМ-14266 ГОСНИ-ТИ моющим средством «Лабомид-203» и передают на комплектацию с золотниками посредством селективной сборки.

Изношенные пояски золотников обрабатывают на бесцентрошлифовальном станке С250 до выведения следов износа с применением алмазного круга АСМ 7/5 при следующих режимах: частота вращения подающего круга – 30 мин^{-1} , частота вращения алмазного круга – 1400 мин^{-1} . Управление программное.

При проведении операций шлифования в рабочую зону подается СОЖ Oilcool 3000 UNI или аналогичная.

После обработки пояски золотников наращивают НКЭП на основе железа в установке для нанесения композиционных электролитических покрытий (рисунок 4.11), на которую получен патент на изобретение РФ № 2680116 (приложение Е).

Для этого золотники крепят на подвеску, изолируют все участки, не подлежащие покрытию перхлорвиниловой эмалью ХВ-124 ГОСТ 10144-89. Затем золотники подвергают обезжириванию для удаления с поверхности жировых пленок и отложений.

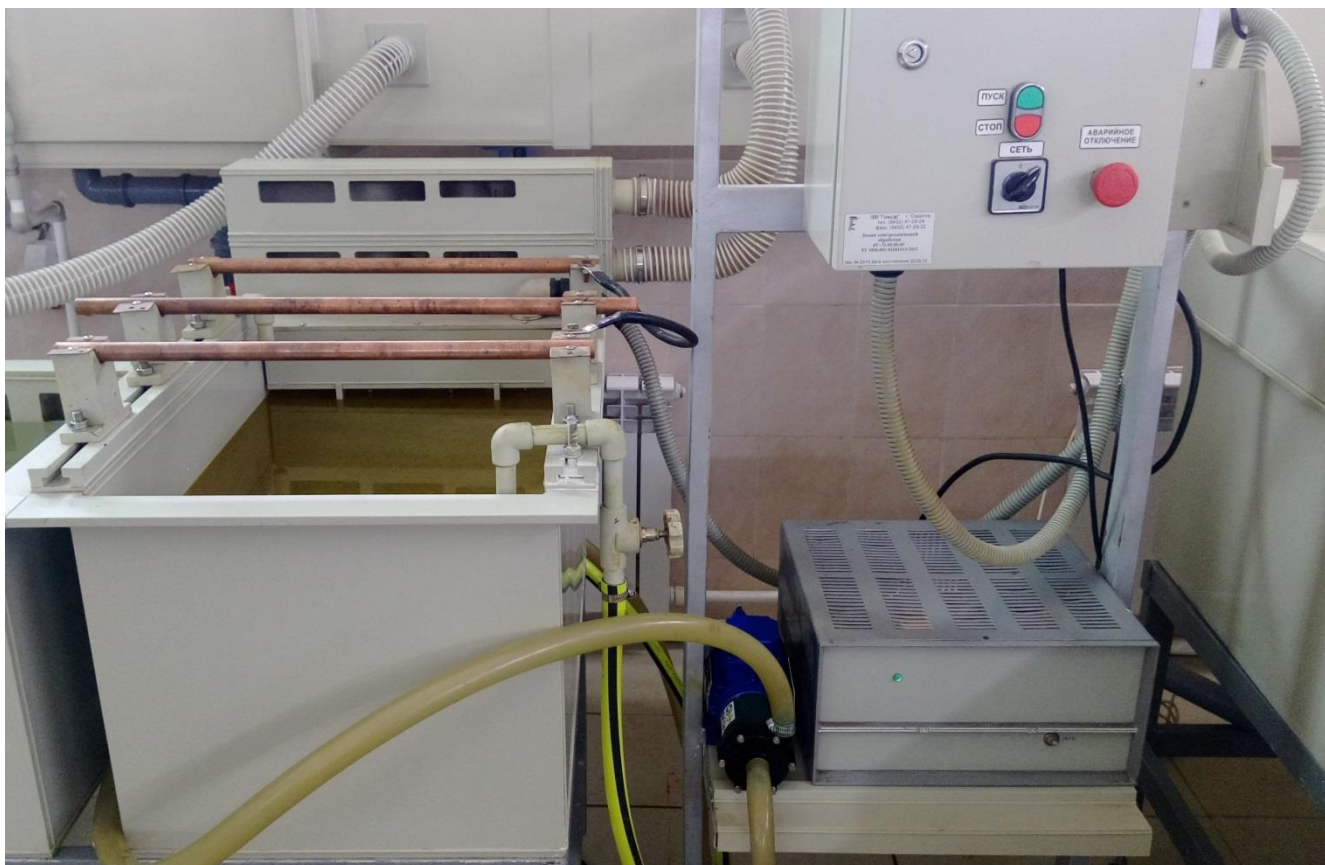


Рисунок 4.11 – Установка для нанесения композиционных электролитических покрытий

Обезжиривание ведут в электролите 10% гидроксида натрия с добавлением углекислого натрия и натриевого жидкого стекла для интенсификации процесса и связывания инородных частиц и выпадения их в осадок. Режимы обработки: плотность катодного тока – 20 А/дм^2 , температура электролита 50°C , время операции 5–6 мин. После промывки поочередно в горячей и холодной проточных водах золотники подвергают декапированию в электролите 30% серной кислоты для удаления окисных пленок и более тщательного обезжиривания поверхностей. Режимы обработки: плотность катодного тока – 20 А/дм^2 , температура электролита 25°C , время операции 2–3 мин.

После промывки поочередно в горячей и холодной проточных водах проводят нанесение НКЭП из электролита следующего состава: хлорид железа – 200...300 г/л; соляная кислота – 1...1,5 г/л; хлористый марганец – 5...10 г/л, наноразмерные частицы нитрида алюминия – 3,1 г/л. Режимы электролиза: плотность катодного тока – 21 А/дм^2 , температура электролита 70°C , время операции – до необходимой величины наносимого слоя. Скорость осаждения покрытия 100–150 мкм/ч.

После нанесения покрытия золотники промывают последовательно в горячей и холодной проточных водах и проводят пассивацию в 10% растворе гидроксида натрия в течение 10 минут. Для повышения экономической эффективности процесса допускается проводить пассивацию НКЭП в электролите обезжиривания. Далее золотники окончательно промывают поочередно в горячей и холодной водах, демонтируют с подвесок и проводят контроль полученных покрытий. Контроль диаметров восстановленных поясков золотников ведут с применением микрометра МКЦ 50 ГОСТ 6507-90, лупы х5 ГОСТ 25706-83. Образцы с вздутиями, порами, непокрытыми участками и с отслаиванием покрытия, а так же с толщиной покрытия менее рассчитанной выбраковывают. Далее золотники обрабатывают на бесцентрошлифовальном станке С250 до требуемого размера при описанных выше режимах и передают на комплектацию с корпусами посредством селективной сборки.

Приработку золотника в отверстие корпуса осуществляют путем возвратно-поступательного перемещения золотника с одновременным вращением, предварительно смазав его пастой ГОИ, разведенной в индустриальном масле И20 в пропорции: две части пасты к одной части масла. В процессе сборки гидрораспределителей обезличивание приработанных золотниковых пар не допускается.

Описанная технология разработана совместно с ООО «Сельхозтехника» и ООО «Саратовдизельаппарат» и передана на предприятия вместе с полным комплектом технологической документации (приложение Ж).

4.8 Результаты стендовых испытаний

Испытания проводили согласно методике, описанной в третьей главе. Работоспособность гидрораспределителя оценивали по величине утечек в золотниковой паре. Работоспособным считается гидрораспределитель, величина утечек которого не превышает $40 \text{ см}^3/\text{мин}$ [2, 35]. Результаты стендовых испытаний представлены на рисунке 4.12 и в приложении И.

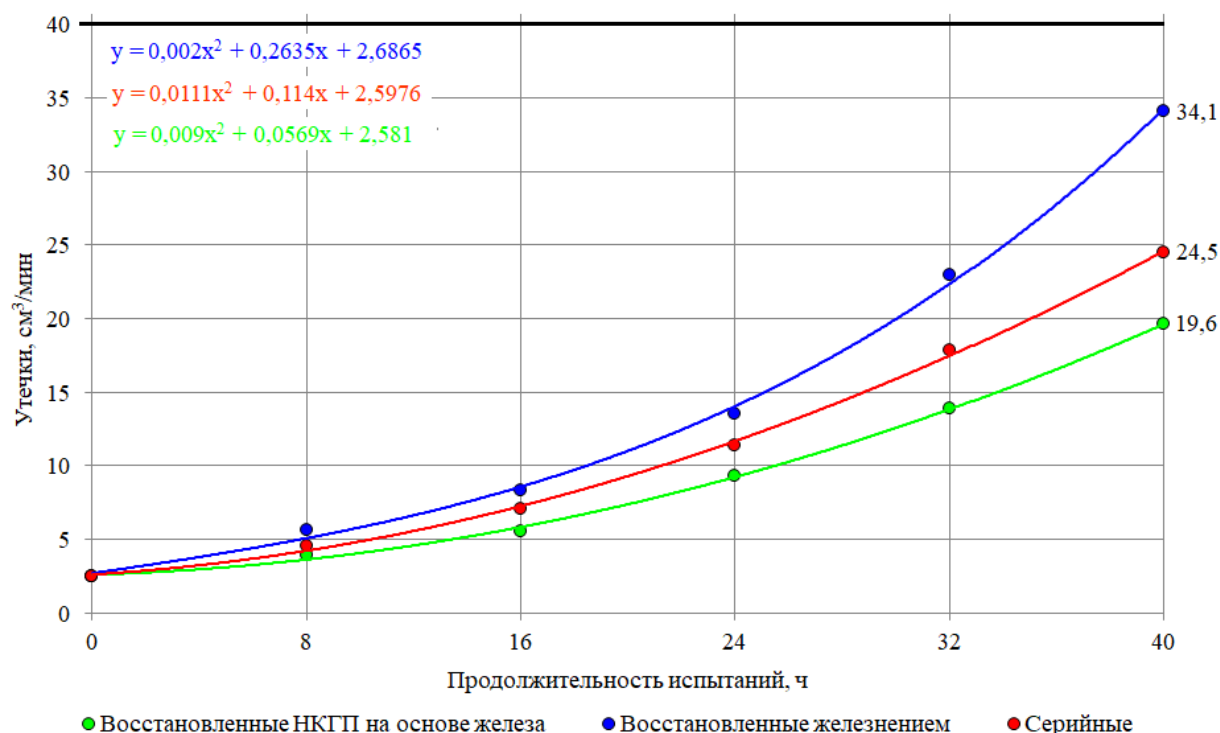


Рисунок 4.12 – Результаты стендовых испытаний гидрораспределителей

После проведения стендовых испытаний было установлено, что все гидрораспределители не достигли предельного состояния. Величина утечек у гидрораспределителей, золотниковые пары которых восстанавливали с применением НКЭП на основе железа составила 19,6 см³/мин, что в 1,75 раза меньше, чем у гидрораспределителей, золотниковые пары которых восстанавливали по существующей технологии, и в 1,25 раз меньше, чем у серийных гидрораспределителей. Полученные результаты подтверждаются актами стендовых испытаний, проведенных в ООО «Сельхозтехника» и ООО «Саратовдизельаппарат» (приложение К).

Разработанная технология восстановления золотниковых пар гидрораспределителей типа Р160 с применением НКЭП на основе железа внедрена в ООО «Сельхозтехника» и ООО «Саратовдизельаппарат», что подтверждается актами внедрения (приложение Л).

4.9 Результаты эксплуатационных испытаний

Результаты эксплуатационных испытаний наиболее адекватно описывают процесс изнашивания золотниковых пар, так как износ в этом случае не

моделируется и происходит посредством реальных воздействий на них в процессе работы тракторов.

Испытания проводили по методике, описанной в третьей главе. Результаты эксплуатационных испытаний представлены на рисунке 4.13 и в приложении М.

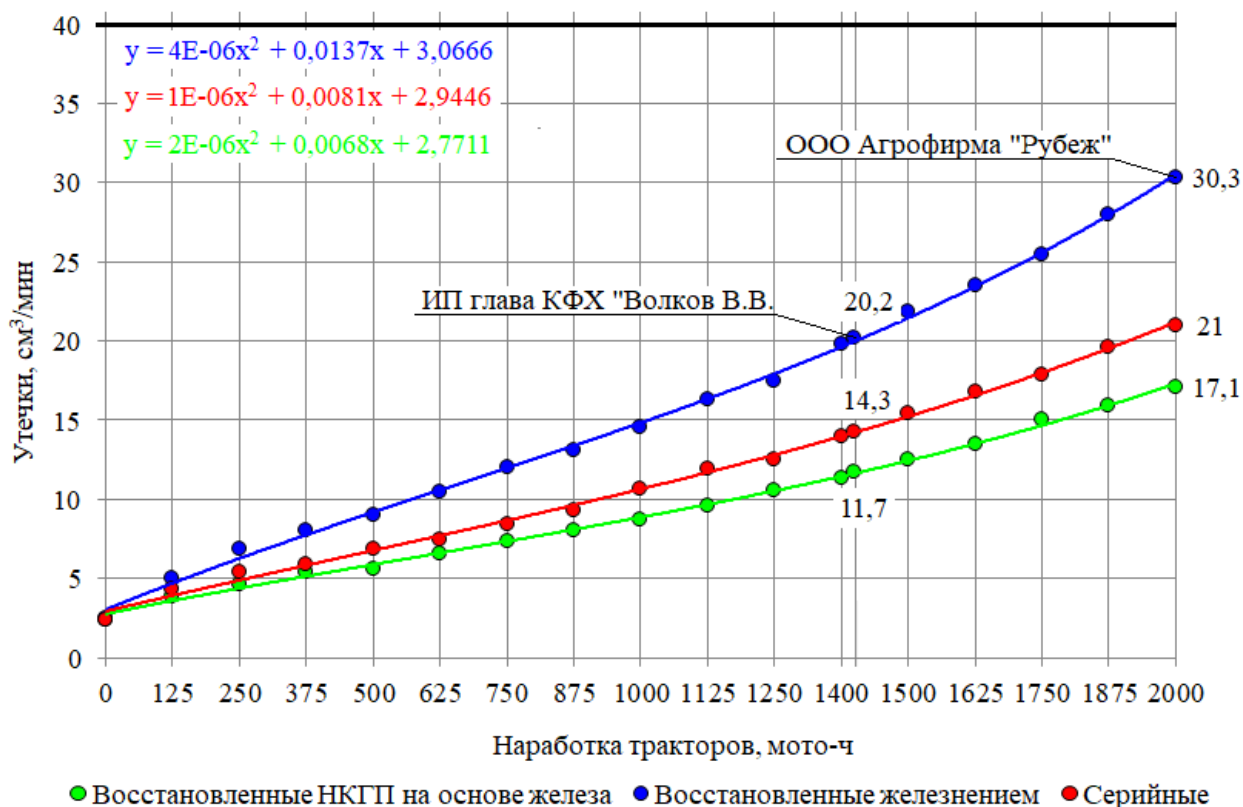


Рисунок 4.13 – Результаты эксплуатационных испытаний гидрораспределителей

В течение всего периода испытаний отказов опытных гидрораспределителей не произошло. Средняя наработка тракторов, испытываемых в ИП глава КФХ «Волков В.В.» составила 1400 мото-ч. Величина утечек в гидрораспределителях, золотниковые пары которых были восстановлены НКЭП на основе железа, составила 11,7 см³/мин, что в 1,75 раза меньше, чем в гидрораспределителях, золотниковые пары которых восстановлены по существующей технологии, и в 1,2 раза меньше, чем у серийных гидрораспределителей.

Средняя наработка тракторов, испытываемых в ООО «Агрофирма «Рубеж» составила 2000 мото-ч. Величина утечек гидрораспределителей, золотниковые пары которых были восстановлены НКЭП на основе железа, составила 17,1 см³/мин, что в 1,8 раза меньше, чем в гидрораспределителях, золотниковые пары которых

восстановлены по существующей технологии, и в 1,25 раза меньше, чем у серийных гидрораспределителей. Полученные результаты подтверждаются актами эксплуатационных испытаний в ИП глава КФХ «Волков В.В.» и ООО «Агрофирма «Рубеж» (приложение Н).

Полученные данные дают возможность спрогнозировать остаточный ресурс гидрораспределителей.

4.10 Прогнозирование остаточного ресурса гидрораспределителей

Для прогнозирования остаточного ресурса испытываемых гидрораспределителей Р160 необходимо определить величину утечек через золотниковые пары в зависимости от наработки трактора. Для этого удобнее всего использовать модель – формулу, помогающую связать объясняемую переменную y (в нашем случае величину утечек) и объясняющую переменную x (в нашем случае наработку трактора).

Прогнозирование проводили по данным, взятым в виде перекрестных рядов из результатов эксплуатационных испытаний. Анализируя эти данные, предположили, что модель будет иметь простую квадратичную форму:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \varepsilon_i, \quad (4.3)$$

где x и y – наблюдаемые переменные, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ – коэффициенты модели, показывающие, насколько увеличиваются утечки, если трактор проработал 1 мото-ч; ε – погрешность измерений.

Для дальнейшего проведения планирования определяли метод, позволяющий по исходному набору значений рассчитать оценки коэффициентов $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$. Их использование вместо коэффициентов $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ давало возможность получить значения прогнозируемых величин утечек гидрораспределителя по зависимости:

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i + \hat{\beta}_2 x_i^2. \quad (4.4)$$

Погрешность измерений ε не прогнозируется, в связи с чем в формуле (4.4) она не учитывается.

Наиболее точно дать оценку искомым коэффициентов по предполагаемой модели может метод наименьших квадратов (МНК). Согласно МНК, ошибку прогноза определяли по выражению:

$$\hat{\varepsilon}_i = y_i - \hat{y}_i, \quad (4.5)$$

а суммарную ошибку прогноза:

$$Q(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (4.6)$$

где n – количество наблюдений переменной y .

Используя МНК можно определить такие $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$, при которых сумма квадратов ошибок прогноза Q минимальна.

Подставив в формулу (4.4) выражение (4.6), получим:

$$Q(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i + \hat{\beta}_2 x_i^2)^2. \quad (4.7)$$

Для минимизации ошибок прогноза брали первую производную от полученного выражения и приравнивали ее к нулю:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \hat{\beta}_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i + \hat{\beta}_2 x_i^2) = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial \hat{\beta}_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i + \hat{\beta}_2 x_i^2) x_i = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial \hat{\beta}_2} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i + \hat{\beta}_2 x_i^2) x_i^2 = 0. \end{cases} \quad (4.8)$$

После преобразования получали:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n y_i = n\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_i^2, \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i = \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n x_i + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_i^3, \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 = \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_i^4. \end{cases} \quad (4.9)$$

Система линейных алгебраических уравнений (4.9) является условием первого порядка, из нее получали искомые значения коэффициентов $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$. Для этого решали эту систему методом Крамера, найдя ее определители:

$$\begin{aligned}
\Delta &= \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \end{vmatrix}, \Delta_0 = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \end{vmatrix}, \\
\Delta_1 &= \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i x_i & \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \end{vmatrix}, \Delta_2 = \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 \end{vmatrix}.
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Значения коэффициентов $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ определяли как отношение соответствующего определителя к общему:

$$\hat{\beta}_0 = \frac{\Delta_0}{\Delta}, \quad \hat{\beta}_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad \hat{\beta}_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta}. \tag{4.11}$$

Подставляя значения полученных коэффициентов в уравнение (4.4), получали прогнозируемые значения утечек через золотниковые пары для соответствующей наработки трактора (приложение II).

Значения остаточного прогнозируемого ресурса складывали с экспериментальными значениями и получали полный межремонтный ресурс сопряжения, который сравнивали с теоретическими значениями ресурса, определенными по формуле (2.9) с учетом зависимости (2.18). Полученные результаты представлены на рисунке 4.14.

Из представленных данных видно, что прогнозируемый ресурс гидрораспределителей Р160 с золотниковыми парами, восстановленными по предлагаемой технологии с применением НКЭП на основе железа, составит 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.

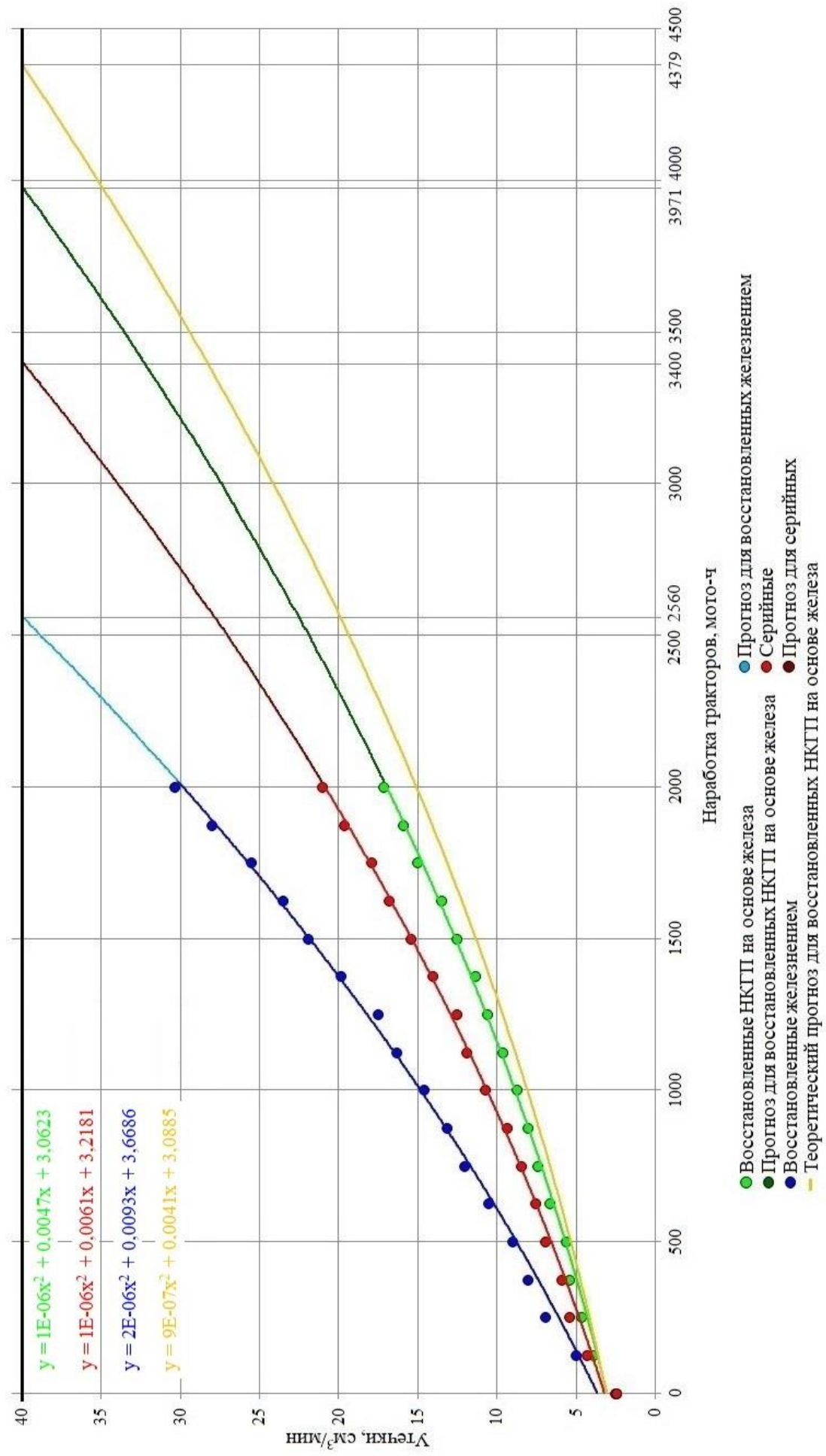


Рисунок 4.14 – Сравнение полных прогнозируемых и теоретического ресурсов гидрораспределителей Р160

Теоретическое значение ресурса для гидрораспределителей с золотниковыми парами, восстановленными по предлагаемой технологии, составило 4379 мото-ч, расхождение с экспериментальными значениями – 10,3 %. Полученные значения позволяют сделать вывод о справедливости предложенной теоретической зависимости (2.9).

4.11 Выводы по разделу

1. Исследование влияния материалов и концентрации наноразмерных частиц на микротвердость электролитического покрытия на основе железа позволило выбрать нитрид алюминия в концентрации 3 г/л как наиболее эффективный, позволяющий достичь наибольшей микротвердости покрытия по сравнению с другими исследованными наноразмерными материалами.

2. Сравнение теоретических значений микротвердости с экспериментальными данными с расхождением менее 15 % подтверждает высокую достоверность предлагаемой теоретической зависимости.

3. Для определения установленных режимов нанесения нанокomпозиционных электролитических покрытий и концентрация наноразмерных частиц нитрида алюминия для получения установленных физико-механических свойств покрытия, было проведено математическое планирование эксперимента. В результате установлено, что микротвердости 713 HV покрытие достигает при температуре электролита 70 °С, плотности катодного тока 21 А/дм² и концентрации наноразмерных частиц в электролите 3,1 г/л.

4. Проведенные исследования на прочность сцепления исследуемого покрытия с основным материалом методами опиловки, изгиба и изменения температур показали, что нанокomпозиционное электролитическое покрытие на основе железа с наноразмерными частицами нитрида алюминия удовлетворяет всем требованиям ГОСТ 9.302–88 и может быть использовано в ремонтном производстве.

5. 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. Спектральный химический анализ покрытий показал, что в нанокпозиционном электролитическом покрытии на основе железа, кроме железа, углерода и хлора содержатся алюминий и азот, которые отсутствуют в классическом покрытии. Это доказывает предположение о внедрении наноразмерных частиц в покрытие при его нанесении.

6. Ускоренные трибологические испытания показали, что суммарный износ по массе в чистой смазочной среде у пары трения, на ролики которой нанесено нанокпозиционное электролитическое покрытие на основе железа, в 1,7 раза меньше, чем у пары трения, на ролики которой нанесено классическое покрытие железа, и в 1,3 раза меньше, чем у образцов без покрытия. В загрязненной смазочной среде – соответственно в 1,6 и 1,35 раза. При этом было отмечено снижение момента трения в чистой смазочной среде у образцов с нанокпозиционным электролитическим покрытием на 9% по сравнению с образцами, покрытыми классическим железнением, и на 2% по сравнению с образцами без покрытия. В загрязненной смазочной среде – соответственно на 4% и 2%. Представленные результаты показывают, что нанокпозиционное электролитическое покрытие на основе железа обладает повышенной износостойкостью по сравнению с классическим железнением и сталью 15Х.

7. Результаты коррозионных испытаний показали, что у образцов, покрытых нанокпозиционным электролитическим покрытием на основе железа, износ по массе в 1,6 раза меньше, чем у образцов, покрытых классическим электролитическим железом, и в 1,1 раза больше, чем у образцов из стали 15Х без покрытия. Из представленных данных следует, что включения наноразмерных частиц в электролитические покрытия повышают их коррозионную стойкость.

8. На основании проведенных исследований нанокпозиционного электролитического покрытия на основе железа разработан технологический процесс восстановления золотниковых пар гидрораспределителя Р160 3/1-222 с применением указанного покрытия.

9. В результате проведения стендовых испытаний было установлено, что величина утечек у гидрораспределителей, золотниковые пары которых были

восстановлены по разработанному технологическому процессу с применением нанокпозиционного электролитического покрытия на основе железа, в 1,75 раза меньше, чем у гидрораспределителей, золотниковые пары которых были восстановлены по существующей технологии, и в 1,25 раза меньше, чем у серийных гидрораспределителей.

10. 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. Величина утечек у гидрораспределителя, золотниковые пары которого восстанавливали по предлагаемой технологии, в 1,75–1,8 раза меньше, чем у гидрораспределителя, золотниковые пары которых восстанавливали по существующей технологии, и в 1,2–1,25 раза меньше, чем у серийного гидрораспределителя.

11. По данным эксплуатационных испытаний было проведено прогнозирование остаточного ресурса гидрораспределителей, а также рассчитаны теоретические значения ресурса. Полученные результаты позволили установить, что ресурс гидрораспределителя, золотниковые пары которого восстанавливали по разработанной технологии, в 1,55 раза больше, чем ресурс гидрораспределителя, золотниковые пары которого восстанавливали по предлагаемой технологии, и в 1,2 раза больше, чем ресурс серийного гидрораспределителя. При этом схождение теоретических значений ресурса с эксплуатационными составляет не более 11 %, что подтверждает справедливость предложенной теоретической гипотезы.

5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

5.1 Определение показателей экономической эффективности существующей и предлагаемой технологий

Технико-экономическую эффективность внедрения технологии восстановления золотниковых пар гидрораспределителей типа Р160 с применением НКЭП на основе железа рассчитывали по формуле [95]:

$$\mathcal{E} = \left[(C_{\text{ст}} + E_{\text{н}} K_{\text{ст}}) \frac{k_{\text{р ст}} + E_{\text{н}}}{k_{\text{р пт}} + E_{\text{н}}} - (C_{\text{пт}} + E_{\text{н}} K_{\text{пт}}) \right] N, \quad (5.1)$$

где $C_{\text{ст}}$, $C_{\text{пт}}$ – себестоимость детали сопряжения, восстановленной соответственно по существующей и предлагаемой технологиям, руб.; $E_{\text{н}}$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, $E_{\text{н}} = 0,15$ [146]; $K_{\text{ст}}$, $K_{\text{пт}}$ – удельные капитальные вложения на приобретение технологического оборудования, необходимого для проведения ремонта по существующей и предлагаемой технологиям, руб.; $k_{\text{р ст}}$, $k_{\text{р пт}}$ – коэффициенты, характеризующие годовой износ детали от ее полного ресурса, восстановленного по существующей и предлагаемой технологиям соответственно; N – годовой объем деталей, восстанавливаемых и упрочняемых по предлагаемой технологии, шт.

При этом принимали следующие параметры режима работы цеха по восстановлению золотниковых пар гидрораспределителя Р160: количество рабочих смен – 1, продолжительность смены – 8 ч, количество рабочих дней в неделе – 5, продолжительность рабочей недели – 40 ч, количество рабочих дней в году – 246.

Годовой объем деталей, восстанавливаемых и упрочняемых по предлагаемой технологии, рассчитывали по формуле [14]:

$$N = \Pi_{\text{г}} k_{\text{max}}^{\text{п}}, \quad (5.2)$$

где $\Pi_{\text{г}}$ – годовая программа капитального ремонта гидрораспределителей Р160, шт.; $k_{\text{max}}^{\text{п}}$ – наибольший коэффициент повторяемости дефекта, устраняемого по предлагаемой технологии.

Годовая программа капитального ремонта гидрораспределителей Р160 $\Pi_r = 1200$ шт. Наибольший коэффициент повторяемости дефекта, устраняемого по предлагаемой технологии, – $k_{\max}^{\Pi} = 0,8$ [146]. Тогда годовой объем деталей, восстанавливаемых и упрочняемых по предлагаемой технологии, с учетом того, что гидрораспределители оборудованы тремя золотниковыми парами:

$$N = 1200 \cdot 0,8 \cdot 3 = 2880 \text{ шт.}$$

Коэффициенты, характеризующие годовой износ детали от ее полного ресурса, восстановленного по существующей и предлагаемой технологиям, вычисляли по формулам [14]:

$$k_{p \text{ ст}} = \frac{Q}{T_{\text{ст}}}; \quad k_{p \text{ пт}} = \frac{Q}{T_{\text{пт}}}, \quad (5.3)$$

где Q – годовая наработка тракторов, мото-ч; $T_{\text{ст}}$, $T_{\text{пт}}$ – средние межремонтные ресурсы сопряжений, восстановленных по существующей и предлагаемой технологиям соответственно.

Для тракторов, снабженных гидрораспределителями типа Р160, среднегодовая наработка $Q = 1200$ мото-ч. Средние межремонтные ресурсы сопряжений, восстановленных по существующей технологии классическим электролитическим железнением, – $T_{\text{ст}} = 2560$ мото-ч; серийных – $T_c = 3400$ мото-ч; восстановленных по предлагаемой технологии с применением НКЭП на основе железа – $T_{\text{пт}} = 3971$ мото-ч. Тогда:

$$k_{p \text{ ст}} = \frac{1200}{2560} = 0,47;$$

$$k_{p \text{ пт}} = \frac{1200}{3971} = 0,3.$$

Себестоимость восстановления определяли из уравнения [93]:

$$C = C_{\text{зп}} + C_{\text{м}} + C_{\text{тз}} + C_{\text{э}} + C_{\text{а}} + C_{\text{з}} + C_{\text{п}}, \quad (5.4)$$

где $C_{\text{зп}}$ – заработная плата производственных рабочих с начислениями, руб.; $C_{\text{м}}$ – затраты на материалы, руб.; $C_{\text{тз}}$ – транспортно-заготовительные расходы, руб.; $C_{\text{э}}$ – затраты на электроэнергию, руб.; $C_{\text{а}}$ – амортизационные отчисления, руб.; $C_{\text{з}}$ – заводские расходы, руб.; $C_{\text{п}}$ – прочие расходы, руб.

Заработную плату производственным рабочим определяли по формуле [14]:

$$C_{\text{зп}} = C_{\text{осн}} + C_{\text{доп}} + C_{\text{со}}, \quad (5.5)$$

где $C_{\text{осн}}$ – основная заработная плата производственных рабочих, руб.; $C_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.; $C_{\text{со}}$ – отчисления на социальные нужды, руб.

Основная заработная плата производственных рабочих, производящих восстановление по существующей технологии, – $C_{\text{осн}}^{\text{ст}} = 85$ руб.

Основную заработную плату производственных рабочих, производящих восстановление и упрочнение по предлагаемой технологии, рассчитывали исходя из норм времени на выполнение операций и действующей тарифной сетки [93]:

$$C_{\text{осн}}^{\text{пт}} = C_{\text{тс}}^{\text{пт}} t_{\text{шт}}^{\text{пт}}, \quad (5.6)$$

где $C_{\text{тс}}^{\text{пт}}$ – часовая тарифная ставка выполняемой работы, руб./ч; $t_{\text{шт}}^{\text{пт}}$ – время на восстановление и упрочнение одного золотника, ч.

Все работы по восстановлению золотниковой пары по предлагаемой технологии НКЭП на основе железа выполняли рабочие четвертого и пятого разрядов, для которых часовая тарифная ставка $C_{\text{тс}}^{\text{пт}} = 152$ руб./ч. Время на восстановление одной золотниковой пары $t_{\text{шт}}^{\text{пт}} = 0,57$ ч. Отсюда основная заработная плата:

$$C_{\text{осн}}^{\text{пт}} = 152 \cdot 0,57 = 86,6 \text{ руб.}$$

Дополнительную заработную плату рассчитывали по формуле [146]:

$$C_{\text{доп}} = 0,1 C_{\text{осн}}. \quad (5.7)$$

Тогда дополнительная заработная плата при восстановлении по существующей и предложенной технологиям:

$$C_{\text{доп}}^{\text{ст}} = 85 \cdot 0,1 = 8,5 \text{ руб.};$$

$$C_{\text{доп}}^{\text{пт}} = 86,64 \cdot 0,1 = 8,7 \text{ руб.}$$

Отчисления на социальные нужды определяли по формуле [93]:

$$C_{\text{со}} = 0,3(C_{\text{осн}} + C_{\text{доп}}). \quad (5.8)$$

Тогда отчисления на социальные нужды при восстановлении по существующей и предложенной технологиям:

$$C_{\text{со}}^{\text{ст}} = 0,3 \cdot (85 + 8,5) = 28,1 \text{ руб.};$$

$$C_{\text{со}}^{\text{пт}} = 0,3 \cdot (86,6 + 8,7) = 28,6 \text{ руб.}$$

Заработная плата производственных рабочих, производящих восстановление по существующей и предлагаемой технологиям:

$$C_{\text{зп}}^{\text{ст}} = 85 + 8,5 + 28,1 = 121,6 \text{ руб.};$$

$$C_{\text{зп}}^{\text{пт}} = 86,6 + 8,7 + 28,6 = 123,9 \text{ руб.}$$

Затраты на материалы рассчитывали по формуле [14]:

$$C_{\text{м}} = \sum M_i C_i, \quad (5.9)$$

где M_i – норма расхода материалов на изделие, кг, л или м^3 ; C_i – цена применяемых материалов, руб.

Затраты на материалы, расходуемые на восстановление золотниковых пар по существующей технологии классическим электролитическим железнением и по предлагаемой технологии с применением НКЭП на основе железа, представлены в таблицах 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1 – Материалы, применяемые при восстановлении золотниковых пар по существующей технологии

Наименование материала	Норма на изделие	Цена	Цена на изделие, руб.
Алмазный круг 1A1 ACM 7/5 B2-01	0,019 кг	5811,5 руб./кг	110,4
Ветошь обтирочная	0,002 кг	90 руб./кг	0,2
Вода дистиллированная	0,6 л	10 руб./л	6
Вода техническая	0,022 м^3	23,74 руб./ м^3	0,5
Гидроксид натрия NaOH	0,008 кг	72 руб./кг	0,6
Лабомид	0,033 кг	60 руб./кг	2
Мадаполам	0,5 м^2	40 руб./ м^2	20
Натриевое жидкое стекло Na_2SiO_3	0,012 кг	76,9 руб./кг	0,9
Перхлорвиниловая эмаль XB-124	0,036 кг	150 руб./кг	5,4
Серная кислота H_2SO_4	0,003 кг	55 руб./кг	0,2
СОЖ	0,05 л	50,5 руб./л	2,5
Соляная кислота HCl	0,005 кг	37 руб./кг	0,2
Углекислый натрий Na_2SO_3	0,0008 кг	25 руб./кг	0,02
Хлористое железо $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0,015 кг	388 руб./кг	5,8
Итого			154,7

Таблица 5.2 – Материалы, применяемые при восстановлении золотниковых пар по предлагаемой технологии

Наименование материала	Норма на изделие	Цена	Цена изделия, руб.
Алмазный круг 1A1 АСМ 7/5 В2-01	0,019 кг	5811,5 руб./кг	110,4
Ветошь обтирочная	0,002 кг	90 руб./кг	0,2
Вода дистиллированная	0,6 л	10 руб./л	6
Вода техническая	0,022 м ³	23,74 руб./м ³	0,5
Гидроксид натрия NaOH	0,008 кг	72 руб./кг	0,6
Лабомид	0,033 кг	60 руб./кг	2
Мадаполам	0,5 м ²	40 руб./м ²	20
Марганец хлористый MnCl ₂ 4H ₂ O	0,0001 кг	400 руб./кг	0,04
Наночастицы AlN	0,00005 кг	10000 руб./кг	0,5
Натриевое жидкое стекло Na ₂ SiO ₃	0,002 кг	76,9 руб./кг	0,9
Перхлорвиниловая эмаль ХВ-124	0,036 кг	150 руб./кг	5,4
Серная кислота H ₂ SO ₄	0,003 кг	55 руб./кг	0,2
СОЖ	0,05 л	50,5 руб./л	2,5
Соляная кислота HCl	0,005 кг	37 руб./кг	0,2
Углекислый натрий Na ₂ SO ₃	0,0008 кг	25 руб./кг	0,02
Хлористое железо FeCl ₂ 4H ₂ O	0,015 кг	388 руб./кг	5,8
Итого			155,3

Транспортно-заготовительные расходы определяли по формуле [93]:

$$C_{\text{ТЗ}} = 1,2C_{\text{ост}}, \quad (5.10)$$

где $C_{\text{ост}}$ – остаточная стоимость ремонтного фонда, руб.

Остаточная стоимость ремонтного фонда [146]:

$$C_{\text{ост}} = 0,03C_{\text{н}}, \quad (5.11)$$

где $C_{\text{н}}$ – цена нового золотника, руб.

Средняя цена нового золотника для гидрораспределителя Р160 3/1-222 по ценам 2019 г. $C_{\text{н}} = 700$ руб. Тогда остаточная стоимость:

$$C_{\text{ост}} = 0,03 \cdot 700 = 21 \text{ руб.}$$

Транспортно-заготовительные расходы:

$$C_{\text{тз}} = 1,2 \cdot 24 = 25,2 \text{ руб.}$$

Технологическое оборудование, применяемое при восстановлении золотниковых пар по существующей и предлагаемой технологиям, приведено в таблице 5.3.

Мощность потребителей энергии: $P^{\text{ст}} = 23,22 \text{ кВт}$, $P^{\text{пт}} = 26,72 \text{ кВт}$.

Затраты на электроэнергию рассчитывали по формуле [14]:

$$C_{\text{э}} = \frac{P \cdot C_{\text{э}} \cdot k_w \cdot W_{\text{п}}}{N}, \quad (5.12)$$

где $C_{\text{э}}$ – цена электроэнергии, руб./кВт·ч, $C_{\text{э}} = 3,48 \text{ руб./кВт·ч}$; k_w – коэффициент, учитывающий загрузку и КПД силового оборудования, $k_w = 0,75$; $W_{\text{п}}$ – среднегодовое потребление электроэнергии, ч, $W_{\text{п}} = 1968 \text{ ч}$ [146].

$$C_{\text{э}}^{\text{ст}} = \frac{23,22 \cdot 3,48 \cdot 0,75 \cdot 1968}{2880} = 41,4 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{э}}^{\text{пт}} = \frac{26,72 \cdot 3,48 \cdot 0,75 \cdot 1968}{2880} = 47,7 \text{ руб.}$$

Таблица 5.3 – Оборудование, применяемое при восстановлении золотниковых пар по существующей и предлагаемой технологиям

Наименование оборудования	Количество, шт.		Мощность, кВт	Стоимость единицы оборудования, тыс. руб.
	существующая	предлагаемая		
1	2	3	4	5
Бесцентрошлифовальный станок С250	1	1	12,4	420
Ванна железнения	1	0	—	75
Ванна анодного травления	1	1	—	35
Ванна электролитического обезжиривания	1	1	—	35
Ванна промывочная	2	2	—	25
Вертикально-хонинговальный станок 3К833	1	1	8,12	200
Высокочастотный блок питания IVT-ZY-100A-6V	1	1	0,6	68,5

Продолжение таблицы 5.3

1	2	3	4	5
Высоочастотный блок питания IVT-ZY-100A-6V	1	1	0,6	68,5
Ларь для обтирочных материалов	1	1	–	2
Машина моечная ОМ-14266	1	1	2,1	160
Стол дефектовщика ОРГ-1468-099А	1	1	–	20
Стол монтажный ОРГ 1468-01-060А	1	1	–	15
Установка для нанесения электролитических покрытий	0	1	2	90
УЗГИ 0,5-1	0	1	1,5	15
Итого	Существующая технология			1080,5
	Предлагаемая технология			1110,5

Амортизационные отчисления определяли по зависимости [93]:

$$C_a = \frac{0,067C_0}{N}, \quad (5.13)$$

где C_0 – балансовая стоимость оборудования, руб.

Тогда амортизационные отчисления для восстановления по существующей и предлагаемой технологиям:

$$C_a^{\text{ст}} = \frac{0,067 \cdot 1080500}{2880} = 25,1 \text{ руб};$$

$$C_a^{\text{пт}} = \frac{0,067 \cdot 1110500}{2880} = 25,8 \text{ руб}.$$

Заводские расходы принимаем в размере 140 % от заработной платы производственных рабочих с начислениями [146]:

$$C_z = 1,4C_{\text{зп}}. \quad (5.14)$$

Тогда заводские расходы при восстановлении золотниковых пар по существующей и предлагаемой технологиям:

$$C_3^{\text{ст}} = 1,4 \cdot 121,6 = 170,2 \text{ руб.};$$

$$C_3^{\text{пт}} = 1,4 \cdot 123,9 = 173,5 \text{ руб.}$$

Прочие отчисления составляют 15 % от затрат на материалы [14]:

$$C_{\text{п}} = 0,15 C_{\text{м}}. \quad (5.15)$$

Тогда прочие отчисления на восстановление по существующей и предлагаемой технологиям:

$$C_{\text{п}}^{\text{ст}} = 0,15 \cdot 154,7 = 23,2 \text{ руб.};$$

$$C_{\text{п}}^{\text{пт}} = 0,15 \cdot 155,3 = 23,3 \text{ руб.}$$

Себестоимость восстановления золотниковой пары по существующей и предлагаемой технологиям, согласно формуле (5.4):

$$C_{\text{ст}} = 121,6 + 154,7 + 25,2 + 41,4 + 25,1 + 170,2 + 23,2 = 561,4 \text{ руб.};$$

$$C_{\text{пт}} = 123,9 + 155,3 + 25,2 + 47,7 + 25,8 + 173,5 + 23,3 = 574,7 \text{ руб.}$$

Удельные капитальные вложения определяли по формуле [93]:

$$K = \frac{C_o}{N}. \quad (5.16)$$

Тогда, удельные капитальные вложения при восстановлении золотниковых пар по существующей и предлагаемой технологиям:

$$K_{\text{ст}} = \frac{1080500}{2880} = 375,2 \text{ руб.};$$

$$K_{\text{пт}} = \frac{1110500}{2880} = 385,6 \text{ руб.}$$

5.2 Определение технико-экономической эффективности технологии восстановления и упрочнения

Экономическую целесообразность ремонта рассчитали по формуле [146]:

$$\frac{C_{\text{н}} - C_{\text{ост}}}{T_{\text{с}}} \geq \frac{C_{\text{пт}} + E_{\text{н}} K_{\text{пт}}}{T_{\text{пт}}}; \quad (5.17)$$

$$\frac{700 - 21}{3400} \geq \frac{574,7 + 0,15 \cdot 385,6}{3971};$$

$$0,2 \geq 0,16.$$

Поскольку условие неравенства выполняется, ремонт можно считать экономически целесообразным.

Технико-экономическая эффективность внедрения предлагаемой технологии восстановления золотниковых пар, согласно формуле (5.1):

$$\Xi = \left[(561,4 + 0,15 \cdot 375,2) \frac{0,47 + 0,15}{0,3 + 0,15} - (574,7 + 0,15 \cdot 385,6) \right] \cdot 2880 = 629239 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений определяли по выражению [93]:

$$T_o = \frac{(C_{пт} - C_{ст})N + K_d}{\Xi}, \quad (5.18)$$

где K_d – дополнительные капитальные вложения, которые включают в себя затраты на оборудование, приобретаемое для внедрения технологии – это установка для нанесения электролитических покрытий стоимостью 90000 руб. Тогда:

$$T_o = \frac{(574,7 - 561,4) \cdot 2880 + 115000}{629239} = 0,25 \text{ года.}$$

5.3 Выводы по разделу

1. Проведено определение показателей экономической эффективности существующей и предлагаемой технологий. Установлено, что годовой объем гидрораспределителей, поступающих в ремонт по Саратовской области, будет приблизительно равен 1200 шт. Себестоимость восстановления золотника по существующей и предлагаемой технологиям составила 561,4 и 574,7 руб. соответственно. Удельные капитальные вложения для реализации существующей и предлагаемой технологий составили 375,2 и 385,6 руб. соответственно.

2. Полученные данные показателей экономической эффективности определили экономическую целесообразность восстановления золотниковой пары по предлагаемой технологии. Технико-экономическая эффективность внедрения технологии восстановления золотниковых пар гидрораспределителей типа P160 с применением нанокomпозиционного электролитического покрытия на основе железа составила более 600 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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 нанокompозиционного 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 нанокompозиционного электролитического покрытия на основе железа. С помощью математического анализа данной модели

установлена теоретическая зависимость (2.9), 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 нанокomпозиционного 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 нанокomпозиционное 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 нанокomпозиционным 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 нанокomпозиционное электролитическое покрытие 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 P160 с применением нанокomпозиционного электролитического покрытия на основе железа.

5. Стендовыми 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 нанокпозиционным 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 ремонтных мастерских, предусматривающих наличие гальванического цеха.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Направлениями дальнейшего исследования по данной тематике могут быть:

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Авдеев, М. В.** Технология ремонта машин и оборудования / М. В. Авдеев, Е. Л. Воловик, И. Е. Ульман. – М. : Агропромиздат, 1986. – 247 с.
2. Агрегаты гидроприводов сельскохозяйственной техники. Технические требования на капитальный ремонт ТК 70.0001.018–85. – М. : ГОСНИТИ, 1986. – 152 с.
3. **Адлер, Ю. П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1986. – 128 с.
4. **Акимов, Г. В.** Теория и методы исследования коррозии металлов / Г. В. Акимов. – М. ; Л. : АН СССР, 1965. – 414 с.
5. **Антропов, Л. И.** Композиционные электрохимические покрытия / Л. И. Антропов, Ю. Н. Лебединский. – Киев : Техника, 1989. – 200 с.
6. **Антропов Л. И.** Теоретическая электрохимия / Л.И. Антропов. – М. : Высшая школа, 1983. – 400 с.
7. **Артемьев, Ю. Н.** Качество ремонта и надежность машин в сельском хозяйстве / Ю. Н. Артемьев. – М. : Колос, 1991. – 239 с.
8. **Ачкасов, К. А.** Прогрессивные способы ремонта сельскохозяйственной техники / К. А. Ачкасов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Колос, 1992. – 271 с.
9. **Баймаков, Ю. В.** Электролиз в гидрометаллургии : учеб. пособие для вузов / Ю. В. Баймаков, А.И. Журин. – М. : Metallurgia, 1977. – 336 с.
10. **Барышев, В. И.** Повышение надежности и долговечности гидросистем тракторов и дорожно-строительных машин в эксплуатации / В. И. Барышев. – Челябинск, 1973. – 110 с.
11. **Батищев, А. Н.** Ресурсосберегающая технология восстановления деталей гальваническими покрытиями : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. Н. Батищев – М., 1992. – 53 с.
12. **Батищев, А. Н.** Восстановление деталей сельскохозяйственной техники / А. Н. Батищев, И. Г. Голубев, В. П. Лялькин. – М. : Информагротех. 1995. – 296 с.
13. **Бахтиаров, Н. И.** Повышение надежности работы прецизионных пар / Н. И. Бахтиаров, В. Е. Логинов, Н. И. Лихачев. – М. : Машиностроение, 1985. – 286 с.

14. **Бахтиаров, Н. И.** Производство и эксплуатация прецизионных пар / Н. И. Бахтиаров, В. Е. Логинов. – М. : Машиностроение, 1979. – 203 с.
15. **Бахтиаров, Н. И.** Технология обработки прецизионных пар / Н. И. Бахтиаров, В. Е. Логинов. – М. : Машгиз, 1963. – 287 с.
16. **Блестящие и комбинированные покрытия** / А. И. Бодневас [и др.]. – М. : МДНТП, 1967. – 344 с.
17. **Бородин, И. Н.** Порошковая гальванотехника / И. Н. Бородин. – М. : Машиностроение, 1990. – 218 с.
18. **Бородин, И. Н.** Упрочнение деталей композиционными покрытиями / И. Н. Бородин. – М. : Машиностроение, 1982. – 141 с.
19. **Браутман, Л. А.** Композиционные материалы / Л. А. Браутман, Р. В. Крок. – М. : Мир, 1981. – 672 с.
20. **Бурак, П. И.** Реализация инновационных технологий технического сервиса / П. И. Бурак, И. Г. Голубев. – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. – 164 с.
21. **Вандышев, В. А.** Восстановление изношенных деталей строительных машин композиционными электролитическими покрытиями на основе хрома с целью повышения их долговечности и надежности / В. А. Вандышев. – Киев, 1973. – 186 с.
22. **Величко, С. А.** Пути повышения межремонтного ресурса силовых гидроцилиндров / С. А. Величко, П. В. Сенин, П. В. Чумаков // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2015. – № 4. – С. 36–41.
23. **Величко, С. А.** Ремонт сопряжения поршень - гильза силовых гидроцилиндров / С. А. Величко, П. В. Чумаков, М. Г. Тятюшкина // Сельский механизатор. – 2018. – № 1. – С. 38–40.
24. **Величко, С. А.** Точечная оценка параметров распределения доремонтного ресурса импортных гидрораспределителей сельхозтехники / С. А. Величко, А. В. Мартынов // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 3. – С. 47–49.
25. **Величко, С. А.** Экономическая эффективность ремонта гидроагрегатов методом электроискровой обработки / С. А. Величко, П. В. Чумаков, А. В. Мартынов // Сельский механизатор. – 2018. – № 1. – С. 18–20.

26. **Власов, П.А.** Надежность сельскохозяйственной техники / П.А. Власов. – Пенза : РИО ПГСХА, 2001. – 124 с.
27. **Воловик, Е. Л.** Справочник по восстановлению деталей / Е. Л. Воловик. – М. : Колос, 1981. – 351 с.
28. Газовая сварка и наплавка цветных металлов и сплавов / Т. А. Асиновская [и др.]. – М. : Машиностроение, 1984. – 118 с.
29. **Гегузин, Я. Е.** Движение макроскопических включений в твердых телах / Я. Е. Гегузин, М. А. Кривоглаз. – М. : Metallurgy, 1971. – 344 с.
30. Гидравлика и гидропривод / В. Г. Гейер [и др.]. – М. : НЕДРА, 1991. – 301 с.
31. ГОСТ 1050–2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2014. – 36 с.
32. ГОСТ 11098–75. Скобы с отсчетным устройством. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 10 с.
33. ГОСТ 1412–85. Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки. – М. : Изд-во стандартов, 2004. – 5 с.
34. ГОСТ 17216–2001. Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2008. – 9 с.
35. ГОСТ 20245–74. Гидроаппаратура. Правила приемки и методы испытаний. – М. : Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1991. – 48 с.
36. ГОСТ 20799–88. Масла индустриальные. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2005. – 7 с.
37. ГОСТ 2138–91. Пески формовочные. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2005. – 8 с.
38. ГОСТ 2184–2013. Кислота серная техническая. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2014. – 37 с.
39. ГОСТ 23.224–86. Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей. – М. : Стандартинформ, 2005. – 20 с.

40. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М. : Стандартиформ, 2016. – 24 с.
41. ГОСТ 3118–77. Реактивы. Кислота соляная. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 14 с.
42. ГОСТ 4233–77. Реактивы. Натрий хлористый. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 2008. – 19 с.
43. ГОСТ 4461–77. Реактивы. Кислота азотная. Технические условия. – М. : Стандартиформ, 2005. – 9 с.
44. ГОСТ 4543–2016. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия. – М. : Стандартиформ, 2017. – 50 с.
45. ГОСТ 5962–2013. Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья. Технические условия. – М. : Стандартиформ, 2014. – 9 с.
46. ГОСТ 612–75. Реактивы. Марганец (II) хлористый 4-водный. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 8 с.
47. ГОСТ 9.302–88. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 40 с.
48. ГОСТ 9.308–85. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 21 с.
49. ГОСТ 9450–76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М. : Изд-во стандартов, 1993. – 35 с.
50. ГОСТ 9805–84. Спирт изопропиловый. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 17 с.
51. ГОСТ 9.909–86. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы испытаний на климатических испытательных станциях. – М. : Изд-во стандартов, 1999. – 13 с.
52. ГОСТ Р 55064–2012. Натр едкий технический. Технические условия. – М. : Стандартиформ, 2013. – 46 с.

53. ГОСТ OIML R 76–1–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Весы неавтоматического действия. – Ч. 1. Метрологические и технические требования. Испытания. – М. : Стандартиформ, 2013. – 135 с.
54. Григорович, В. К. Твердость и микротвердость металлов / В. К. Григорович. – М. : Наука, 1976. – 230 с.
55. Гринберг, М. А. Оптимизация гальванических процессов в гальванотехнике / М. А. Гринберг, Ю. В. Грановский, В. С. Калмуцкий. – М. : Машиностроение, 1982. – 128 с.
56. Гринберг, М. А. Ультразвук в гальванотехнике / М. А. Гинберг, Н. Я. Федотова. – М. : Metallurgia, 1969. – 208 с.
57. Гуляев, А.П. Металловедение / А. П. Гуляев. – М. : Metallurgia, 1988. – 647 с.
58. Гурьянов, Г. В. Повышение износостойкости деталей машин композиционными покрытиями с включением полиэпоксидов / Г. В. Гурьянов, Ю. Е. Кисель // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2018. – № 3. – С. 13–16.
59. Гурьянов, Г. В. Повышение износостойкости деталей электрохимическими сплавами на основе железа / Г. В. Гурьянов [и др.] // Сельский механизатор. – 2017. – № 2. – С. 34–35.
60. Гурьянов, Г. В. Свойства композиционных гальванических покрытий на основе сплавов железа / Г. В. Гурьянов, Ю. Е. Кисель, А. С. Горьков // Сельский механизатор. – 2016. – № 11. – С. 34–36.
61. Гурьянов, Г. В. Электроосаждение износостойких композиций / Г. В. Гурьянов. – Кишинев : Штиинца, 1985. – 238 с.
62. Данилов, Ю. М. Математика : учебное пособие / Ю. М. Данилов, Н. В. Никонова, С. Н. Нуриева ; под ред. Л. Н. Журбенко, Г. А. Никоновой – М. : ИНФРА-М, 2016. – 496 с.
63. Денисов А. С. Повышение межремонтного ресурса коленчатых валов дизелей восстановленных наплавкой под слоем флюса / А. С. Денисов, А. Р. Асоян, Б. Ф. Тугушев // Мир транспорта и технологических машин. – 2011. – № 4 (35). – С. 9–13.

64. **Дидур, В. А.** Диагностика и обеспечение надежности гидроприводов сельскохозяйственных машин / В. А. Дидур, В. Я. Ефремов. – Киев : Техніка, 1986. – 128 с.
65. **Закиров, Ш. З.** Упрочнение деталей машин электроосаждением железа / Ш. З. Закиров. – Душанбе : ИРФОН, 1978. – 208 с.
66. **Захаров, Ю.А.** К вопросу о совершенствовании гальванических способов восстановления деталей мобильных машин / Ю. А. Захаров, И. А. Спицын, Е. В. Ремзин, Г. А. Мусатов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2014. – №4 (12). – С. 99–104.
67. **Захаров, Ю.А.** Повышение технологической надежности подготовки деталей мобильной техники к гальваническому осаждению цинковых покрытий / Ю. А. Захаров, И. А. Спицын, Г. А. Мусатов // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 1-2 (34). – С. 7.
68. **Ионов, П. А.** Выбор оптимальных режимов восстановления изношенных деталей электроискровой наплавкой : автореф. дис. ... канд. техн. наук / П. А. Ионов – Саранск, 1999. – 18 с.
69. **Кальбус, Г. Л.** Основы эксплуатации навесных систем тракторов / Г. Л. Кальбус ; Украин. акад. с.-х. наук. – Киев, 1984.
70. **Кипер, Е.В.** Точность обработки отверстий корпусов гидрораспределителей различными методами / Е. В. Кипер. – М. : Тракторы и сельскохозяйственные машины, 1989 – 198 с.
71. **Кисель, Ю.Е.** Повышение износостойкости электрохимических покрытий / Ю. Е. Кисель, А. Н. Лысенко, С. П. Симохин // Сельский механизатор. – 2016. – № 10. – С. 36–37.
72. **Киттель, С. В.** Введение в физику твердого тела / С. В. Киттель. – М. : Наука, 1964. – 482 с.
73. **Конкин, М. Ю.** Ресурсосбережение при эксплуатации автотракторной техники / М. Ю. Конкин. – М. : Информагротех, 1998. – 73 с.
74. Конструкционные материалы : справочник / под ред. Б. Н. Арзамасова. – М. : Машиностроение, 1990. – 480 с.

75. **Костецкий, Б. И.** Трение, смазка и износ в машинах / Б. И. Костецкий. – Киев : Техника, 1983. – 215 с.
76. **Коттрелл, А. Х.** Дислокации и пластическое течение в кристаллах / А. Х. Коттрелл. – М. : Металлургия, 1958. – 267 с.
77. **Кочергин, С. М.** Электроосаждение металлов в ультразвуковом поле / С. М. Кочергин, Г. Я. Вяселева. – М. : Высшая школа, 1964. – 111 с.
78. **Кравчук, В. С.** Сопротивление деформированию и разрушению поверхностно-упрочненных деталей машин и элементов конструкций / В. С. Кравчук, А. А. Юсеф, А. В. Кравчук. – Одесса : Астропринт, 2000. – 160 с.
79. **Крагельский, И. В.** Основы расчета на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
80. **Крагельский, И. В.** Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
81. **Крагельский, И. В.** Расчетный метод оценки трения и износа – эффективный путь повышения надежности и долговечности машин / И. В. Крагельский, В. В. Алисин. – М. : Знание, 1976. – 56 с.
82. **Круликова, Е. Г.** Контроль гальванических ванн и покрытий / Е. Г. Круликова, П. М. Вячеславов. – М. : Машгиз, 1961. – 147 с.
83. **Лайнер, В. И.** Защитные покрытия металлов / В. И. Лайнер. – М. : Металлургия, 1984. – 398 с.
84. **Лайнер, В. И.** Современная гальванотехника / В. И. Лайнер. – М. : Металлургия, 1987. – 384 с.
85. **Лебединский, Ю. Н.** Комбинированные электролитические покрытия / Ю. Н. Лебединский. – Киев : Техника, 1980. – 174 с.
86. **Лебединский, Ю. Н.** Дисперсное упрочнение электрохимических покрытий / Ю. Н. Лебединский, Л. И. Антропов // Применение металлопокрытий при производстве и ремонте деталей машин. – Киев : Металлургия, 1987. – С. 308.
87. **Лепешкин, А. В.** Гидравлика и гидропневмопривод : учебник. – Ч. 2. Гидравлические машины и гидропневмопривод / А. В. Лепешкин, А. А. Михайлин, А. А. Шейпак ; под ред. А. А. Шейпака. – М. : МГИУ, 2003. – 352 с.

88. **Лившиц, Б. Г.** Металлография / Б. Г. Лившиц – М. : Metallurgia, 1990. – 336 с.
89. **Ловкис, З. В.** Гидроприводы сельскохозяйственной техники : конструкция и расчет / З. В. Ловкис. – М. : Агропромиздат, 1990. – 239 с.
90. **Лурье, И. Г.** Высшая математика : практикум / И. Г. Лурье, Т. П. Фунтикова – М. : ИНФРА-М, 2016. – 160 с.
91. **Матвеев, А. С.** Зависимость работоспособности тракторной гидросистемы от состояния рабочей жидкости / А. С. Матвеев. – М. : Техника в сельском хозяйстве, 1988. – 90 с.
92. **Матулис, Ю. Ю.** Блестящие и электрохимические покрытия. / Ю. Ю. Матулис. – Вильнюс : Минтис, 1969. – 613 с.
93. **Машков, Ю. К.** Трибология конструкционных материалов / Ю. К. Машков. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 1996. – 304 с.
94. **Мелков, М. П.** Электролитическое наращивание деталей машин твердым железом / М. П. Мелков. – Саратов : Приволж. кн. из-во, 1974. – 202 с.
95. **Мелкумов, Я. С.** Экономическая оценка эффективности инвестиций / Я. С. Мелкумов. – М. : ИКЦ «ДИС», 1997. – 160 с.
96. **Митряков, А. В.** Надежность восстановительной технологии / А. В. Митряков. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 184 с.
97. **Молчанов, В. Ф.** Получение комбинированных покрытий при хромировании / В. Ф. Молчанов. – Киев : Машиностроение, 1964. – 89 с.
98. **Мясоедов, Н. С.** Исследование износа золотниковых пар гидрораспределителей / Н. С. Мясоедов // Тр. ГОСНИТИ. – М., 1982 – 120 с.
99. **Общемашиностроительные нормативы времени на гальванические покрытия и механическую обработку поверхностей до и после покрытия.** – М. : Экономика, 1998. – 123 с.
100. **ОСТ 1.00228–77.** Определение режимов ускоренных эквивалентных испытаний агрегатов управления потоком жидкости. – М. : ГОСНИТИ, 1977. – 30 с.

101. ОСТ 1.90366–85. Система стандартов безопасности труда. Производство металлических и неметаллических неорганических покрытий и травление металлов. – М. : ГОСНИТИ, 1987. – 38 с.

102. ОСТ 114.68.9.542–85. Гидрораспределители золотникового типа. Методы ускоренных испытаний на надежность. – М. : ГОСНИТИ, 1985. – 18 с.

103. Пат. 2207933 Российская Федерация, МПК В 22 F 9/12. Способ получения ультрадисперсного порошка и устройство для его осуществления / В. И. Кириллин, Э. К. Добринский, Е. А. Красюков, С. И. Малашин. – № 2001118997/02 ; заявл. 10.07.2001 ; опубл. 10.07.2003, Бюл. № 19.

104. Пат. 2238174 Российская Федерация, МПК В 22 F 9/14. Способ получения ультрадисперсного порошка и устройство для его осуществления / В. Ю. Мелешко, В. А. Карелин, Г. Я. Павловец, С. И. Малашин, Э. К. Добринский, Е. А. Красюков. – № 2008103489/02 ; заявл. 05.02.2008 ; опубл. 20.12.2009, Бюл. № 29.

105. 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.

106. Пат. 2680116 Российская Федерация, ИПК С25D 15/00, С25D 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.

107. **Пашин, Ю. Д.** Исследование некоторых технологических процессов восстановления деталей шестеренчатых насосов тракторных гидросистем : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю. Д. Пашин – Саратов, 1967. – 40 с.

108. **Петров, Ю. Н.** Влияние условий электролиза на свойства электролитических железных покрытий / Ю.Н. Петров. – Душанбе : Таджикгосиздат, 1957. – 247 с.

109. **Петров, Ю. Н.** Ремонт автотракторных деталей гальваническими покрытиями / Ю.Н. Петров. – Кишинев : Картя Молдовеняскэ, 1983. – 149 с.

110. **Поляк, М. С.** Технология упрочнения. Технол. методы упрочнения : в 2 т. / М. С. Поляк. – М. : Машиностроение, 1995. – Т. 2. – 668 с.

111. **Пустыльник, Е. И.** Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. – М. : Наука, 1988. – 288 с.
112. **Рагигскене, С. С.** Влияние условий формирования КЭП Ni–TiO₂ на фазовый состав и микротвердость / С. С. Рагигскене, К. Х. Гайгалас // Труды АН Лит. ССР. – Сер. Б. – 1979. – Т. 1 (110). – С. 29.
113. **Раманаускене, Д. Я.** О включении керамических микропорошков в никелевые покрытия / Д. Я. Раманаускене, Ю. Ю. Матулис // Труды АН Лит. ССР. – Сер. Б. – 1975 – Т. 3 (88). – С. 29–33.
114. Распределитель гидравлический типа Р80 ТУ 3. У 00235814-002-93 : паспорт / ОАО «Мелитопольский завод тракторных гидроагрегатов».
115. Распределитель гидравлический типа Р100 ТУ У 29.3-00235814-031-2004 : паспорт / ОАО «Мелитопольский завод тракторных гидроагрегатов».
116. Распределитель гидравлический типа Р160 ТУ У3.37-00235814-006-95 : паспорт / ОАО «Мелитопольский завод тракторных гидроагрегатов».
117. Результаты стендовых испытаний гидрораспределителей, восстановленных с применением наноконпозиционного гальванического железнения / В. В. Сафонов [и др.] // Научная жизнь. – 2019. – № 2. – С. 43–50.
118. Ремонт гидроприводов сельскохозяйственной техники : уч. пособие / В. К. Петряков [и др.] – Саратов : ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2004. – 100 с.
119. **Рылякин, Е. Г.** Повышение работоспособности тракторных гидросистем терморегулированием рабочей жидкости : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е. Г. Рылякин – Пенза, 2007. – 22 с.
120. **Сайфуллин, Р. С.** Композиционные покрытия и материалы / Р. С. Сайфуллин. – М. : Химия, 1977. – 272 с.
121. **Сайфуллин, Р. С.** Неорганические композиционные материалы / Р. С. Сайфуллин. – М. : Химия, 1983. – 304 с.
122. **Саутин, С. Н.** Планирование эксперимента в химии и химической технологии / С. Н. Саутин. – Л. : Химия, 1977. – 48 с.
123. **Северный, А. Э.** Защита сельскохозяйственной техники от коррозии / А. Э. Северный, Е. А. Пучин. – М. : АгроНИИТЭИИТО, 1990. – 51 с.

124. Сельскохозяйственные тракторы. Технические и эксплуатационные характеристики / под ред. Н. А. Щельцына – М. : Гильдия «АПК-ПРЕСС», 2007. – 144 с.
125. **Сергеев, В. З.** Восстановление и упрочнение прецизионных пар гидрораспределителей сельскохозяйственной техники / В. З. Сергеев ; ЦНИИТЭИ Госкомсельхозтехники СССР. – М., 1984. – С. 48–51.
126. **Соловьев, Б. М.** Детонационно-газовое напыление изношенных деталей / Б. М. Соловьев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1991. – № 12. – С. 34.
127. Справочник по гальванотехнике / под ред. В. И. Лайнера. – М. : Металлургия, 1987. – 586 с.
128. Справочное руководство по гальванотехнике / под ред. В. И. Лайнера. – М. : Металлургия, 1987. – 280 с.
129. **Старосельский, А. А.** Долговечность трущихся деталей машин / А. А. Старосельский, Д. Н. Гаркунов. – М. : Машиностроение, 1967. – 394 с.
130. **Сырицын, Т.А.** Эксплуатация и надежность гидро- и пневмоприводов / Т. А. Сырицын. – М. : Машиностроение, 1990. – 248 с.
131. Технология упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственной техники нанокompозиционным гальваническим железнением / В. В. Сафонов [и др.] // Научная жизнь. – 2019. – № 2. – С. 33-42.
132. **Травин, О. В.** Материаловедение : учебник для вузов / О. В. Травин, Н. Т. Травина. – М. : Металлургия, 1989. – 384 с.
133. Физико-математическая модель механизма упрочнения гальванических покрытий наноразмерными материалами / В. В. Сафонов [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 7. – С. 55–58.
134. **Филатов, В. И.** Композиционные электроосаждаемые материалы / В. И. Филатов. – Кишинев : Машиностроение, 1986. – 76 с.
135. **Фудзии, Т.** Механика разрушения композиционных материалов / Т. Фудзии, М. Дзахо ; пер. с яп. С. Л. Масленникова. – М. : Мир, 1982. – 232 с.

136. **Хабибуллин, И. Г.** Коррозионная стойкость металлов с дисперсно-упрочненными покрытиями / И. Г. Хабибуллин, Р. А. Усманов. – М. : Машиностроение, 1991. – 113 с.
137. **Хрущев, М. М.** Абразивное изнашивание / М. М. Хрущев, М. А. Бабичев. – М. : Наука, 1970. – 252 с.
138. **Хрущев, М. М.** Износостойкость и структура твердых наплавов / М. М. Хрущев, М. А. Бабичев. – М. : Машиностроение, 1985. – 394 с.
139. **Цыпцын, В. И.** Повышение долговечности отремонтированных дизелей совершенствованием технологии приработки и применением упрочняющих покрытий : автореф. дис. ... док. техн. наук / В. И. Цыпцын – М., 1991. – 28 с.
140. **Черкун, В. Е.** Ремонт и долговечность тракторных гидравлических систем / В. Е. Черкун. – М. : Колос, 1972. – 254 с.
141. **Черкун, В. Е.** Ремонт тракторных гидравлических систем / В. Е. Черкун. – М. : Колос, 1984. – 253 с.
142. **Черновол, М. И.** Исследование процесса осаждения и свойств электролитических металлополимерных покрытий на основе железа для ремонта авто-тракторных деталей / М. И. Черновол. – Саратов, 1980. – 205 с.
143. **Шамко, В. К.** Применение электродуговой металлизации при восстановлении деталей / В. К. Шамко, Г. Д. Захаренко, В. Л. Гуревич // Техника в сельском хозяйстве. – 1986. – № 11 – С. 40.
144. **Шипачев, В. С.** Задачник по высшей математике : учеб. пособие / В. С. Шипачев. – 10-е изд., стер. – М. : ИНФРА-М, 2016. – 304 с.
145. **Шмаков, А. М.** Восстановление деталей тракторов газотермическим напылением / А. М. Шмаков // Техника в сельском хозяйстве. – 1986. – № 4. – С. 51.
146. Экономика : справочное пособие / под ред. Д. В. Валовой [и др.]. – М. : Интел-Синтез, 2001. – 432 с.
147. **Юдина Е.М.** Влияние прочностных параметров композиционных покрытий на их износостойкость при абразивном изнашивании / Е. М. Юдина, Г. В. Гурьянов, Ю. Е. Кисель // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2017. – № 6 (68). – С. 89–92.

148. **Ansell, F. S.** Trans / F. S. Ansell, F. V. Lenel. – AJME, 1981. – 221 p.
149. Composition, Morphology, and Topography of Galvanic Coatings Fe-Co-W and Fe-Co-Mo / I. Y. Yermolenko [et al.] // Nanoscale Research Letters. – 2017. – Vol. 12 – No. 1. – P. 352.
150. Effect of Alumina Nanoparticles on the Structure and Physicochemical Properties of Chromium Coatings / V. V. Safonov [et al.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2015. – Vol. 51. – No. 6. – P. 517–522.
151. Formation of Thick Layer Electro-Spark Coatings for Restoring Worn-Out Parts of Power Hydraulic Cylinders / S. A. Velichko [et al.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2017. – Vol. 53. – No. 2. – P. 116–123.
152. Galvanische abscheidung von dispersionsschichten und mikrostrukturen aus nickel mit AlN-nanopartikeln zur verbesserung der mechanischen eigenschaften / J. Lorenz [unt andere]. Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2006. – 93 s.
153. http://www.minagro.saratov.gov.ru/development/index.php?ELEMENT_ID=8051&sphrase_id=36315
154. Insight into Physicomechanical and Tribological Properties of Copper Galvanic Coatings Formed with the Addition of Electroerosion Copper Nanopowder / E. V. Ageeva [et al.] // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2017. – Vol. 58. – No. 2. – P. 161–167.
155. Investigation of Structure and Wear Resistance of Nanocomposite Coating of Chemical Nickel / V. Safonov [et al.] // Tribology in Industry. – 2018. – Vol. 40. – No. 4. – P. 529–537.
156. **Honeycombe, R. W. K.** The Plastic Deformation of Metals / R. W. K. Honeycombe. – London : Edward Arnold, 1968. – 408 p.
157. **Metzger, W.** Abscheidung galvanische dispersionsüberzug / W. Metzger // Metaloberfläche. – 1980. – Bd. 34. – № 7. – S. 274–277.
158. Optimisation of the Electrodeposition Process of Ni-W/ZrO₂ Nanocomposites / E. Beltowska-Lehman [et al.] // Journal of Electroanalytical Chemistry. – 2018 – Vol. 813. – P. 39–51.
159. **Prince, I. D.** Trans ammer elektrochem sos. / I. D. Prince, G. G. Fink. – 1989. 54. – 315 p.

160. **Puippe, I.** Elektrodeposition par impulsions der caurant / I. Puippe, H. Anqerer, H. Schenk // Oberflache (Surfache). – 1979. – Vol. 20. – № 4. – S. 77–85.

161. **Raghupathy, Y.** Microstructure, Electrochemical Behaviour and Bio-Fouling of Electrodeposited Nickel Matrix-Silver Nanoparticles Composite Coatings on Copper / Y. Raghupathy, K.A. Natarajan, Chandan Srivastava // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 328 – P. 266–275.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А
(справочное)

Дипломы





VII ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ФОРУМ



ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

ПРОЕКТ
«СВЕРХТВЁРДЫЕ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ»

ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова»

(Сафонов Валентин Владимирович, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой
«ТСИТКМ»; Шишурин Сергей Александрович, канд. техн. наук,
доцент каф. «ТСИТКМ»; Горбушин Павел Александрович, аспирант)

за активное участие
в VII ИНДУСТРИАЛЬНОМ ФОРУМЕ

(25 - 27 августа, САРАТОВ)

САРАТОВ
СОФИТ-ЭКСПО



Генеральный директор
Выставочного Центра
«СОФИТ-ЭКСПО»



А.С. Бурлачук





ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.И. ВАВИЛОВА



ДИПЛОМ

награждается

Горбушин

Павел Александрович

магистр 1 курса факультета инженерии и природообустройства
Научный руководитель - Шишурин С.А.

за III место
в конкурсе научно-инновационных работ среди
студентов, аспирантов и молодых ученых университета,
направление «Технические науки»

Ректор



Н.И. Кузнецов

Саратов 2016



VIII САРАТОВСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ФОРУМ



ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

**ГОРБУШИН
ПАВЕЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

АСПИРАНТ САРАТОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АГРАРНОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. Н.И.ВАВИЛОВА

за участие в экспозиции
«Инновационные разработки» в рамках

VIII САРАТОВСКОГО ИНДУСТРИАЛЬНОГО ФОРУМА

(23 - 25 августа, САРАТОВ)

Генеральный директор
Выставочного Центра
«СОФИТ-ЭКСПО»



А.С. Бурлачук

**САРАТОВ
софит-экспо**





МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ЗОЛОТАЯ
ОСЕНЬ**



**GOLDEN
AUTUMN**

РОССИЙСКАЯ
АГРОПРОМЫШЛЕННАЯ
ВЫСТАВКА

RUSSIAN
AGRICULTURAL
EXHIBITION

ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ БРОНЗОВОЙ МЕДАЛЬЮ
ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ
(г. Саратов)

*За разработку нанотехнологии повышения ресурса трибосопряжений
сельскохозяйственной техники*

МИНИСТР СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А.Н. ТКАЧЕВ

г. МОСКВА, ВДНХ, 5-8 ОКТЯБРЯ 2016



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.И. ВАВИЛОВА

ДИПЛОМ

награждается

Горбушин

Павел Александрович

Научный руководитель - Шишурин С.А.

за III место

в конкурсе научно-инновационных работ среди
студентов, аспирантов и молодых ученых университета,
направление «Технические науки»
в номинации «Студенческая наука»

Ректор



Н.И. Кузнецов

Саратов 2017



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ЗОЛОТАЯ
ОСЕНЬ**  **GOLDEN
AUTUMN**

РОССИЙСКАЯ
АГРОПРОМЫШЛЕННАЯ
ВЫСТАВКА

RUSSIAN
AGRICULTURAL
EXHIBITION

ДИПЛОМ

награждается серебряной медалью

ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ

г. Саратов

*За разработку технологии нанесения нанокomпозитных покрытий и
смазочных материалов для техники АПК*

МИНИСТР СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А.Н. ТКАЧЕВ

Москва, ВДНХ, 4-7 октября 2017



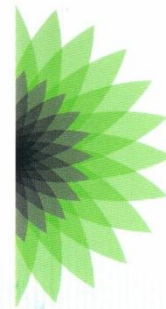
8
LOGO
EXPO

САРАТОВ
софит-экспо



Сельскохозяйственный Форум

САРАТОВ
АГРО



ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

**НИЛ «Применение наноматериалов
при техническом сервисе автотракторной техники»**
(Сафонов В.В., Шишурин С.А., Азаров С.А.,
Венскаяйтис В.В., Горбушин П.А.)
(г. Саратов)

за активное участие в Форуме

«САРАТОВ-АГРО. 2018»

(20 – 21 февраля, САРАТОВ)

Генеральный директор
Выставочного Центра
«СОФИТ-ЭКСПО»



А.С. Бурлачук



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ЗОЛОТАЯ
ОСЕНЬ**



**GOLDEN
AUTUMN**

РОССИЙСКАЯ
АГРОПРОМЫШЛЕННАЯ
ВЫСТАВКА

RUSSIAN
AGRICULTURAL
EXHIBITION



ДИПЛОМ

награждается серебряной медалью

ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» им. Н.И. Вавилова, г. Саратов

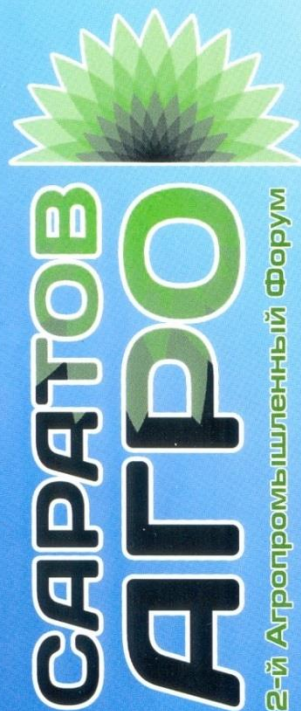
За разработку нанотехнологии электролитического упрочнения деталей топливной и гидравлической систем автотракторной техники

**10-13
октября
2018**

МИНИСТР СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Д.Н. ПАТРУШЕВ

**Москва
ВДНХ**



ДИПЛОМ

ЭХРО 2019

награждается

**НИЛ «Применение
наноматериалов при техническом
сервисе автотракторной техники»**

(Сафонов В.В., Шишурин С.А., Горбушин П.А.)

за активное участие в Форуме

«САРАТОВ-АГРО. 2019»

(19 – 20 февраля, САРАТОВ)



Генеральный директор
Выставочного Центра
«Софит-Экспо»

А.С. Бурлачук

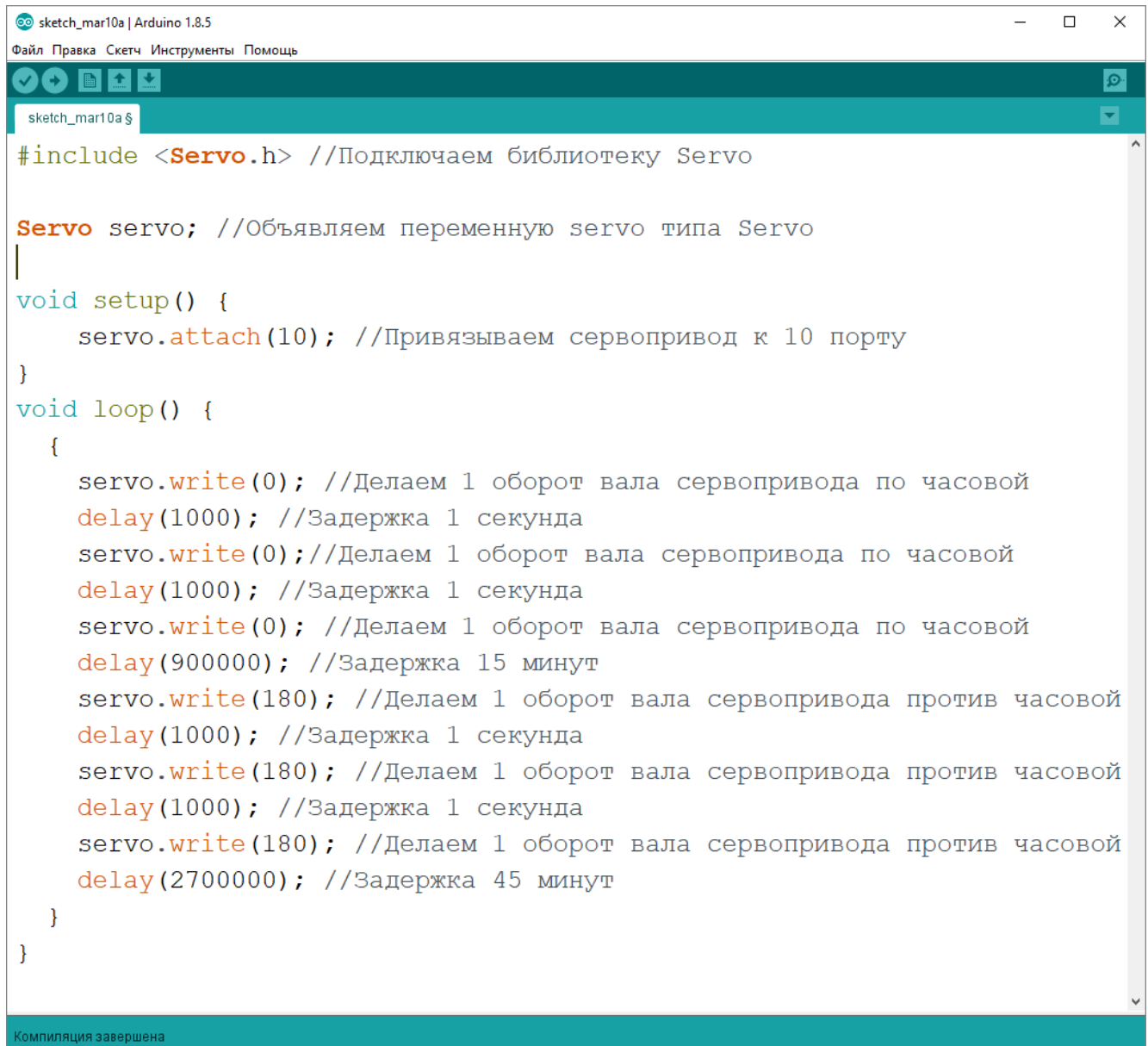


**ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР
СОФИТ-ЭКСПО**



Приложение Б
(справочное)

**Управляющая программа при проведении испытаний
на коррозионную стойкость**



```
sketch_mar10a | Arduino 1.8.5
Файл Правка Скетч Инструменты Помощь

sketch_mar10a $
#include <Servo.h> //Подключаем библиотеку Servo

Servo servo; //Объявляем переменную servo типа Servo

void setup() {
    servo.attach(10); //Привязываем сервопривод к 10 порту
}

void loop() {
    {
        servo.write(0); //Делаем 1 оборот вала сервопривода по часовой
        delay(1000); //Задержка 1 секунда
        servo.write(0); //Делаем 1 оборот вала сервопривода по часовой
        delay(1000); //Задержка 1 секунда
        servo.write(0); //Делаем 1 оборот вала сервопривода по часовой
        delay(900000); //Задержка 15 минут
        servo.write(180); //Делаем 1 оборот вала сервопривода против часовой
        delay(1000); //Задержка 1 секунда
        servo.write(180); //Делаем 1 оборот вала сервопривода против часовой
        delay(1000); //Задержка 1 секунда
        servo.write(180); //Делаем 1 оборот вала сервопривода против часовой
        delay(2700000); //Задержка 45 минут
    }
}

Компиляция завершена
```

Приложение В
(справочное)

**Обработка экспериментальных данных и оценка точности измерений
микротвердости НКЭП при модификации наноразмерными материалами**

Вид наноразмерного материала	Концентрация, г/л	Случайный результат X_i, HV	Среднее арифметиче- ское значение $a_{ср.ар.},$ HV	$(X_i - a_{ср.ар.})^2$	Средняя квадратичная ошибка, α	Вероятностная ошиб- ка, τ	Абсолютная ошибка, m	Мера точности, p
1	2	3	4	5	6	7	8	9
WC	1 г/л	625	626	1	1,41	0,94	1,22	0,49
		628		4				
		625		1				
	3 г/л	656	654	4	1,73	1,15	1,49	0,40
		655		1				
		652		4				
	5 г/л	639	641	4	1,73	1,15	1,49	0,40
		643		4				
		642		1				
SiC	1 г/л	618	618	0	1,29	0,86	1,11	0,54
		620		4				
		617		1				
	3 г/л	666	668	4	1,29	0,86	1,11	0,54
		669		1				
		668		0				
	5 г/л	646	644	4	1,73	1,15	1,49	0,40
		642		4				
		643		1				
TiC	1 г/л	622	624	4	1,63	1,09	1,40	0,43
		624		0				
		626		4				
	3 г/л	651	652	1	1,41	0,94	1,22	0,49
		651		1				
		654		4				
	5 г/л	650	648	4	1,73	1,15	1,49	0,40
		649		1				
		646		4				

1	2	3	4	5	6	7	8	9
AlN	1 г/л	636	635	1	1,00	0,67	0,86	0,70
		634		1				
		634		1				
	3 г/л	681	682	1	1,29	0,86	1,11	0,54
		682		0				
		684		4				
	5 г/л	671	669	4	1,73	1,15	1,49	0,40
		670		1				
		667		4				
Al ₂ O ₃	1 г/л	642	642	0	1,29	0,86	1,11	0,54
		644		4				
		641		1				
	3 г/л	677	676	1	1,00	0,67	0,86	0,70
		675		1				
		675		1				
	5 г/л	670	668	4	1,73	1,15	1,49	0,40
		669		1				
		666		4				
Без наноразмерно-го материала	-	450	452	4	1,29	0,86	1,11	0,54
		452		0				
		453		1				

Приложение Г
(справочное)

**Обработка экспериментальных данных и оценка точности измерений
после ускоренных сравнительных трибологических испытаний**

Пара трения	Условия испытания	Случайный результат X_k МПа	Среднее арифметическое значение $a_{\text{ср.ар.}}$, МПа	$(X_k - a_{\text{ср.ар.}})^2$	Средняя квадратичная ошибка, α	Вероятностная ошибка, t	Абсолютная ошибка, m	Мера точности, p
С НКЭП на основе железа	Чистое масло	43,8	43,6	4	1,73	1,15	1,49	0,40
		43,7		1				
		43,4		4				
	Загрязненное масло	62,2	62,1	1	1,00	0,67	0,86	0,70
		62		1				
		62		1				
С классическим железнением	Чистое масло	73,5	73,7	4	1,29	0,86	1,11	0,54
		73,8		1				
		73,7		0				
	Загрязненное масло	100,6	100,6	0	1,29	0,86	1,11	0,54
		100,7		1				
		100,4		4				
Без покрытия	Чистое масло	56,9	56,7	4	1,73	1,15	1,49	0,40
		56,6		1				
		56,5		4				
	Загрязненное масло	84	83,8	4	1,41	0,94	1,22	0,49
		83,7		1				
		83,7		1				

Приложение Д
(справочное)

**Обработка экспериментальных данных и оценка точности измерений
после коррозионных испытаний**

Образцы	Случайный результат X_k мг	Среднее арифметическое значение $a_{cp.ap.}$, мг	$(X_k - a_{cp.ap.})^2$	Средняя квадратичная ошибка, α	Вероятностная ошибка, ка, т	Абсолютная ошибка, m	Мера точности, p
С НКЭП на основе железа	528	530	4	1,29	0,86	1,11	0,54
	531		1				
	530		0				
С классическим железнением	868	870	4	1,41	0,94	1,22	0,49
	871		1				
	871		1				
Без покрытия	478	480	4	1,73	1,15	1,49	0,40
	481		1				
	482		4				

Приложение Е
(справочное)

Полученные патенты



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2680116

**Установка для получения композиционных
электролитических покрытий**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Саратовский государственный аграрный университет
имени Н.И. Вавилова" (RU)*

Авторы: *Сафонов Валентин Владимирович (RU), Добринский
Эдуард Константинович (RU), Шишуринов Сергей
Александрович (RU), Чумакова Светлана Валентиновна
(RU), Горбушин Павел Александрович (RU)*

Заявка № 2018116958

Приоритет изобретения 07 мая 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 15 февраля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 07 мая 2038 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

[illegible]

[illegible]

Маршрутная карта

[illegible]

Приложение И
(справочное)

Результаты стендовых испытаний гидрораспределителя P160 3/1-222

Утечки, см ³ /мин				Время испытаний, ч
Восстановленные НКЭП на основе железа				
1	2	3	Среднее	
2,6	2,4	2,4	2,5	0
4	3,8	3,9	3,9	8
5,6	5,4	5,5	5,5	16
9,3	9,5	9,2	9,3	24
13,9	13,7	14,1	13,9	32
19,8	19,4	19,5	19,6	40
Восстановленные железнением				Время испытаний, ч
1	2	3	Среднее	
2,6	2,5	2,5	2,5	
5,5	5,5	5,8	5,6	8
8,2	8,6	8,2	8,3	16
13,3	13,4	13,8	13,5	24
22,9	22,8	23,4	23	32
33,7	34,2	34,5	34,1	40
Серийные				Время испытаний, ч
1	2	3	Среднее	
2,5	2,6	2,5	2,5	
4,6	4,4	4,5	4,5	8
7,2	7,2	6,9	7,1	16
11,2	11,6	11,3	11,4	24
17,6	17,7	18,1	17,8	32
24,2	24,8	24,6	24,5	40

Приложение К
(справочное)

Акты стендовых испытаний гидрораспределителей Р160 3/1-222

Утверждаю

Директор



Ю.М. Холодков

«12» октября 2017 г.

**АКТ
СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ Р160-3/1 -222**

Комиссия в составе: представителей ООО «Саратовдизельаппарат»: директора по развитию Голена Т.А., заместителя генерального директора Паршина А.Н. и представителей ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ: профессора, доктора технических наук В.В. Сафонова, доцента С.А. Шишурина, ассистента П.А. Горбушина составила настоящий акт о том, что в ООО «Саратовдизельаппарат» были проведены стендовые испытания гидрораспределителей Р160-3/1-222 с серийными и упрочненными нанокompозиционным гальваническим железнением золотниками.

Испытаниям подвергали два гидрораспределителя с серийными золотниками, два гидрораспределителя с золотниками, восстановленными гальваническим железнением и два гидрораспределителя с золотниками, упрочненными и восстановленными нанокompозиционным гальваническим железнением.

Перед началом испытаний гидрораспределители регулировали и проверяли в соответствии ГОСТ 20245-74 «Гидроаппаратура. Правила приемки и методы испытаний» на стенде КИ-4815М.

Ускоренные испытания каждого распределителя проводили с применением искусственного загрязнителя на стенде КИ-4815М. Продолжительность испытаний каждого золотника 40 ч.

По окончании сравнительных износных испытаний были получены следующие результаты:

1. Величина утечек в гидрораспределителях с серийными золотниками составила $24 \text{ см}^3/\text{мин}$; в гидрораспределителях с золотниками восстановленными гальваническим железнением – $35 \text{ см}^3/\text{мин}$; в гидрораспределителях с золотниками восстановленными и упрочненными нанокompозиционным гальваническим железнением – $19 \text{ см}^3/\text{мин}$.

2. В гидрораспределителях, золотники которых были упрочнены нанокompозиционным железнением, величина утечек в 1,3 раза меньше, чем в серийных, и в 1,8 раза меньше, чем у гидрораспределителей с золотниками восстановленными железнением.

3. Следов задира и схватывания на рабочих поверхностях золотников, в процессе испытаний, не наблюдалось.

Представители

ООО «Саратовдизельаппарат»

 Голень Т.А.

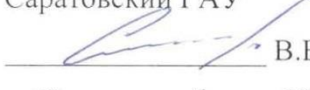
« 12 » октября 2017 г.

 Паршин А.Н.

« 12 » октября 2017 г.

Представители ФГБОУ ВО

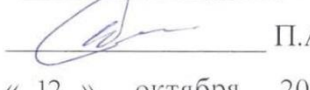
Саратовский ГАУ

 В.В. Сафонов

« 12 » октября 2017 г.

 С.А. Шишурин

« 12 » октября 2017 г.

 П.А. Горбушин

« 12 » октября 2017 г.

Утверждаю

Директор ООО «Сельхозтехника»



В.П. Кузьмин

«26» октября 2017 г.

АКТ
СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ Р160-3/1 -222

Комиссия в составе: представителей ООО «Сельхозтехника»: главного инженера А.А. Ефанова, начальника цеха Д.Н. Кудлаева, технолога А.В. Бубнова и представителей ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ: профессора, доктора технических наук В.В. Сафонова, доцента С.А. Шишурина, ассистента П.А. Горбушина составила настоящий акт о том, что в ООО «Сельхозтехника» были проведены стендовые испытания гидрораспределителей Р160-3/1-222 с серийными и упрочненными нанокompозиционным гальваническим железнением золотниками.

Испытаниям подвергали два гидрораспределителя с серийными золотниками, два гидрораспределителя с золотниками, восстановленными гальваническим железнением и два гидрораспределителя с золотниками, упрочненными и восстановленными нанокompозиционным гальваническим железнением.

Перед началом испытаний гидрораспределители регулировали и проверяли в соответствии ГОСТ 20245-74 «Гидроаппаратура. Правила приемки и методы испытаний» на стенде КИ-4815М.

Ускоренные испытания каждого распределителя проводили с применением искусственного загрязнителя на стенде КИ-4815М. Продолжительность испытаний каждого золотника 40 ч.

По окончании сравнительных износных испытаний были получены следующие результаты:

1. Величина утечек в гидрораспределителях с серийными золотниками составила $24 \text{ см}^3/\text{мин}$; в гидрораспределителях с золотниками восстановленными гальваническим железнением – $34 \text{ см}^3/\text{мин}$; в гидрораспределителях с золотниками восстановленными и упрочненными нанокomпозиционным гальваническим железнением – $18 \text{ см}^3/\text{мин}$.

2. В гидрораспределителях, золотники которых были упрочнены нанокomпозиционным железнением, величина утечек в 1,3 раза меньше, чем в серийных, и в 1,9 раза меньше, чем у гидрораспределителей с золотниками восстановленными железнением.

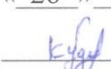
3. Следов задира и схватывания на рабочих поверхностях золотников, в процессе испытаний, не наблюдалось.

Представители

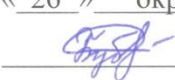
ООО «Сельхозтехника»

 А.А. Ефанов

« 26 » октября 2017 г.

 Д.Н. Кудлаев

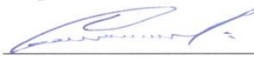
« 26 » октября 2017 г.

 А.В. Бубнов

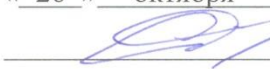
« 26 » октября 2017 г.

Представители ФГБОУ ВО

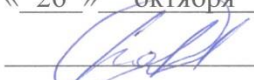
Саратовский ГАУ

 В.В. Сафонов

« 26 » октября 2017 г.

 С.А. Шишурин

« 26 » октября 2017 г.

 П.А. Горбушин

« 26 » октября 2017 г.

Приложение Л
(справочное)

Акты внедрения разработанной технологии восстановления

Утверждаю

Директор



Ю.М. Холодков
«20» ноября 2018 г.

АКТ

**ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ
ЗОЛОТНИКОВ ГИДРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ Р160-3/1-222**

Комиссия в составе: представителей ООО «Саратовдизельаппарат»: директора по развитию Голена Т.А., заместителя генерального директора Паршина А.Н. и представителей ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ: профессора, доктора технических наук В.В. Сафонова, доцента С.А. Шишурина, ассистента П.А. Горбушина составила настоящий акт внедрения технологии восстановления и упрочнения золотников гидрораспределителя Р160-3/1-222.

Основанием для внедрения являлись положительные результаты лабораторных и стендовых испытаний, проведенных в ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ и ООО «Саратовдизельаппарат».

В процессе внедрения выполнен следующий объем работ:

1. В ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ разработана и передана в ООО «Саратовдизельаппарат» техническая документация на технологический процесс восстановления золотников гидрораспределителей Р160-3/1-222.
2. Проведены стендовые испытания восстановленных и упрочненных золотников гидрораспределителей Р160-3/1-222. Результаты испытаний переданы в ООО «Саратовдизельаппарат».
3. Разработаны и переданы в ООО «Саратовдизельаппарат» рекомендации по нанесению композиционного гальванического покрытия на основе железа.

На основании рассмотренных материалов комиссия установила:

1. Признать работу, проводимую сотрудниками ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ актуальной и имеющей важное значение для ремонтных предприятий АПК.

2. Рассмотренная технология является эффективной для восстановления работоспособности и увеличения ресурса золотников гидрораспределителей Р160-3/1-222.

3. Рекомендовать данную технологию к внедрению на предприятиях, занимающихся ремонтом гидравлических систем автотракторной техники.

Представители

ООО «Саратовдизельаппарат»

 Голень Т.А.

« 20 » ноября 2018 г.

 Паршин А.Н.

« 20 » ноября 2018 г.

Представители ФГБОУ ВО

Саратовский ГАУ

 В.В. Сафонов

« 20 » ноября 2018 г.

 С.А. Шишурин

« 20 » ноября 2018 г.

 П.А. Горбушин

« 20 » ноября 2018 г.

Утверждаю

Директор



В.П. Кузьмин

2018 г.

АКТ**ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ
ЗОЛОТНИКОВ ГИДРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ Р160-3/1-222**

Комиссия в составе: представителей ООО «Сельхозтехника»: главного инженера А.А. Ефанова, начальника цеха Д.Н. Кудлаева, технолога А.В. Бубнова и представителей ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ: профессора, доктора технических наук В.В. Сафонова, доцента С.А. Шишурина, ассистента П.А. Горбушина составила настоящий акт внедрения технологии восстановления и упрочнения золотников гидрораспределителя Р160-3/1-222.

Основанием для внедрения являлись положительные результаты лабораторных и стендовых испытаний, проведенных в ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ и ООО «Сельхозтехника».

В процессе внедрения выполнен следующий объем работ:

1. В ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ разработана и передана в ООО «Сельхозтехника» техническая документация на технологический процесс восстановления золотников гидрораспределителей Р160-3/1-222.

2. Проведены стендовые испытания восстановленных и упрочненных золотников гидрораспределителей Р160-3/1-222. Результаты испытаний переданы в ООО «Сельхозтехника».

3. Разработаны и переданы в ООО «Сельхозтехника» рекомендации по нанесению композиционного гальванического покрытия на основе железа.

На основании рассмотренных материалов комиссия установила:

1. Признать работу, проводимую сотрудниками ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ актуальной и имеющей важное значение для ремонтных предприятий АПК.

2. Рассмотренная технология является эффективной для восстановления работоспособности и увеличения ресурса золотников гидрораспределителей Р160-3/1-222.

3. Рекомендовать данную технологию к внедрению на предприятиях, занимающихся ремонтом гидравлических систем автотракторной техники.

Представители

ООО «Сельхозтехника»

 А.А. Ефанов

« 27 » ноября 2018 г.

 Д.Н. Кудлаев

« 27 » ноября 2018 г.

 А.В. Бубнов

« 27 » ноября 2018 г.

Представители ФГБОУ ВО

Саратовский ГАУ

 В.В. Сафонов

« 27 » ноября 2018 г.

 С.А. Шишурин

« 27 » ноября 2018 г.

 П.А. Горбушин

« 27 » ноября 2018 г.

Приложение М
(справочное)

Результаты эксплуатационных испытаний гидрораспределителей Р160 3/1-222

Утечки, см³/мин							Наработка тракторов, мото-ч.
Восстановленные железнением							
Глава КФХ "Волков В.В."			Агрофирма "Рубеж"			Среднее	
1	2	3	1	2	3		
1	2	3	4	5	6	7	8
2,4	2,6	2,6	2,3	2,5	2,6	2,5	0
5,5	5,4	4,6	5,2	5,3	4,8	5	125
6,8	6,5	7,4	7	6,8	6,5	6,9	250
7,5	8,4	7,9	7,6	7,9	8	8	375
8,8	8,9	9,5	8,7	9,2	9	9	500
10,6	10,2	9,8	10,1	10,3	10,8	10,5	625
11,3	12,2	11,8	11,2	11,8	11,7	12	750
13,3	12,7	13,2	12,7	13,2	13,1	13,1	875
14,6	14,8	15,1	14,7	14,5	14,1	14,6	1000
16,1	16,5	16,7	15,8	16,3	15,9	16,3	1125
17,3	18	17,9	17,8	17,5	18,2	17,5	1250
19,9	20,1	19,6	19,8	19,7	19,3	19,8	1375
20,2	20,5	20	-	-	-	20,2	1400
			22,2	21,6	21,4	21,9	1500
			23,9	24	23	23,5	1625
			25,1	25,6	26,6	25,5	1750
			27,7	28,3	28,4	28	1875
			30,1	31	29,8	30,3	2000
Серийные							Наработка тракторов, мото-ч.
Глава КФХ "Волков В.В."			Агрофирма "Рубеж"			Среднее	
1	2	3	1	2	3		
2,6	2,3	2,3	2,2	2,5	2,3	2,4	
4,3	3,8	4,4	4,1	3,9	4,4	4,3	125
5,6	5	5,2	5,1	5,2	5,5	5,4	250
6,2	6,1	6,3	5,7	5,8	6,1	5,9	375

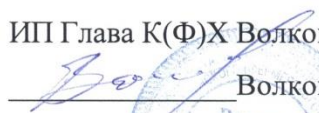
1	2	3	4	5	6	7	8
6,9	6,3	6,4	6,9	6,9	6,7	6,9	500
7,9	7,7	7,4	7,2	7,8	7,5	7,5	625
8,7	8,6	8,1	8,2	8,8	8,4	8,4	750
9,3	9,8	9,7	9,6	9,1	8,9	9,3	875
10,6	10,2	10,8	10,7	10,2	10,6	10,7	1000
12	11,6	11,8	11,4	11,5	11,1	11,9	1125
12,6	12,8	13	12,7	12,8	12,5	12,5	1250
13,8	14	14,3	14,1	13,4	14,2	14	1375
14,1	14,2	14,7	-	-	-	14,3	1400
			14,9	15,2	15,8	15,4	1500
			16,2	16,7	16,8	16,8	1625
			18,1	18,4	17,5	17,9	1750
			19,4	19,9	19,1	19,6	1875
			20,7	21,4	21	21	2000
Восстановленные НКЭП на основе железа							Наработка тракторов, мото-ч.
Глава КФХ "Волков В.В."			Агрофирма "Рубеж"			Среднее	
1	2	3	1	2	3		
2,2	2,6	2,5	2,3	2,2	2,5	2,4	0
3,6	4	3,9	3,6	3,8	3,7	3,9	125
4,4	4,6	4,9	4,5	4,7	4,8	4,6	250
5,2	5,2	5,7	5	5,7	5,2	5,4	375
5,8	6,2	5,9	5,2	5,7	5,8	5,6	500
6,4	6,8	6,4	6,3	6,7	6,6	6,6	625
7,2	6,9	7,4	7,6	7,1	7	7,4	750
7,9	8,4	8,1	7,6	7,8	7,4	8	875
7,9	9,2	8,6	8,5	9	8,8	8,7	1000
9,9	9,2	9,8	9,7	9,3	9,5	9,6	1125
10,5	10,3	10,7	10,3	10,6	10,1	10,6	1250
11,6	11,2	11,8	11,3	11,4	11,7	11,3	1375
11,9	11,3	12	-	-	-	11,7	1400
			12	12,9	12,7	12,5	1500
			13,3	13,2	14,1	13,5	1625
			14,9	14,3	14,8	15	1750
			15,5	15,9	16,2	15,9	1875
			17,1	17,6	16,7	17,1	2000

Приложение Н
(справочное)

Акты эксплуатационных испытаний гидрораспределителей Р160 3/1-222

УТВЕРЖДАЮ

ИП Глава К(Ф)Х Волков В.В.

 Волков В.В.

« 02 » декабря 2018 г.



АКТ

Эксплуатационных испытаний экспериментальных
гидравлических распределителей Р160

Комиссия в составе представителей ИП Глава К(Ф)Х Волков В.В.: заместителя главы КФХ Волкова В.В., главного инженера Волкова А.В., заведующего МТП Фролова В.Е. и представителей ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова: профессора, д.т.н. Сафонова В.В., доцента, к.т.н. Шишурина С.А., ассистента Горбушина П.А. составила настоящий акт о том, что в распоряжении ИП глава КФХ «Волков В.В.» были в эксплуатации три трактора К-700А, оснащенные испытываемыми гидрораспределителями Р160, выполняющими различные виды сельскохозяйственных работ. Один из тракторов комплектовался серийным гидрораспределителем; другой – гидрораспределителем, золотниковые пары которого были восстановлены гальваническим железнением; третий – гидрораспределителем, золотниковые пары которого восстанавливались нанокompозиционным гальваническим железнением. Перед испытаниями все гидрораспределители прошли регулировку на стенде КИ-4815М. В процессе испытаний контролировали наработку тракторов и утечки через испытываемые золотниковые пары. Периодичность замеров утечек составляла 125 мото-ч.

По окончании испытаний установили:

1. Нарботка тракторов с испытываемыми гидрораспределителями составила в среднем 1400 мото-ч. Отказов в работе за период эксплуатации не наблюдалось.

2. Средняя величина утечек в гидрораспределителях, золотниковые пары которых были восстановлены гальваническим железнением составила 20,2 см³/мин, в серийных гидрораспределителях – 14,3 см³/мин, а в гидрораспределителях, золотниковые пары которых были восстановлены нанокмпозиционным гальваническим железнением – 11,7 см³/мин, что в 1,75 раза меньше, чем у гидрораспределителей, золотниковые пары которых были восстановлены по существующей технологии и в 1,2 раза меньше, чем у серийных гидрораспределителей.

Представители

ИП Глава К(Ф)Х Волков В.В.

 В.В. Волков

« 02 » декабря 2018 г.

 В.А. Волков

« 02 » декабря 2018 г.

 В.Е. Фролов

« 02 » декабря 2018 г.

Представители ФГБОУ ВО

Саратовский ГАУ

 В.В. Сафонов

« 02 » декабря 2018 г.

 С.А. Шишурин

« 02 » декабря 2018 г.

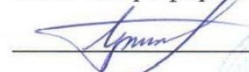
 П.А. Горбушин

« 02 » декабря 2018 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «Агрофирма «Рубеж»

Артемов П.А.

« 05 » декабря 2018 г.



АКТ

Эксплуатационных испытаний экспериментальных
золотниковых пар гидравлических распределителей Р160

Комиссия в составе представителей ООО «Агрофирма «Рубеж»: инженера по эксплуатации МТП Нагаева В.С., заместителя генерального директора на производственном участке Банталова А.П., помощника механика Зайцева С.В. и представителей ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова: профессора, д.т.н. Сафонова В.В., доцента, к.т.н. Шишурина С.А., ассистента Горбушина П.А. составила настоящий акт о том, что в ООО «Агрофирма «Рубеж» находились на эксплуатационных испытаниях шесть тракторов К-700А, оборудованных экспериментальными гидрораспределителями типа Р160 3/1-222, выполняющие различные нормированные сельскохозяйственные работы. Два трактора были укомплектованы гидрораспределителями, золотниковые пары которых были восстановлены нанокompозиционным гальваническим железнением, другие два трактора были укомплектованы гидрораспределителями, золотниковые пары которых были восстановлены по существующей технологии гальваническим железнением, последние два трактора были укомплектованы серийными гидрораспределителями. Перед испытаниями все гидрораспределители были отрегулированы на стенде КИ-4815М. В процессе испытаний контролировали наработку тракторов и техническое состояние испытуемых гидрораспределителей: с периодичностью в 125 мото-ч

измеряли величину утечек гидравлической жидкости через золотниковые пары каждого гидрораспределителя.

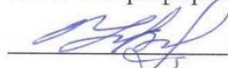
По окончании испытаний было установлено:

1. Нарботка каждого трактора, оборудованного экспериментальным гидрораспределителем, составила в среднем 2000 мото-ч. Отказов в работе за период эксплуатации не наблюдалось.

2. Средняя величина утечек в гидрораспределителях, золотниковые пары которых были восстановлены по существующей технологии гальваническим железнением составила $30,3 \text{ см}^3/\text{мин}$, в серийных гидрораспределителях – $21 \text{ см}^3/\text{мин}$, а в гидрораспределителях, золотниковые пары которых были восстановлены по предлагаемой технологии нанокмпозиционным гальваническим железнением – $17,1 \text{ см}^3/\text{мин}$, что в 1,75 раз меньше, чем у гидрораспределителей, золотниковые пары которого восстанавливали по существующей технологии и в 1,25 раза меньше, чем у серийных гидрораспределителей.

Представители

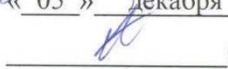
ООО «Агрофирма «Рубеж»

 В.С. Нагаев

« 05 » декабря 2018 г.

 А.П. Банталов

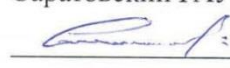
« 05 » декабря 2018 г.

 С.В. Зайцев

« 05 » декабря 2018 г.

Представители ФГБОУ ВО

Саратовский ГАУ

 В.В. Сафонов

« 05 » декабря 2018 г.

 С.А. Шишурин

« 05 » декабря 2018 г.

 П.А. Горбушин

« 05 » декабря 2018 г.

Планирование ресурса гидрораспределителей Р160 3/1-222									
Восстановленные железением			Серийные		Восстановленные НКПГ на основе железа			Наработка тракторов, мото-ч	Теоретическая наработка тракторов, мото-ч
Утечки, см ³ /мин	$\sum_{i=1}^n x_i = 1,70E+04$	$\sum_{i=1}^n x_i^2 = 3,61E+10$	Утечки, см ³ /мин	$\sum_{i=1}^n x_i = 1,70E+04$	$\sum_{i=1}^n x_i^2 = 3,61E+10$	Утечки, см ³ /мин	$\sum_{i=1}^n x_i = 1,70E+04$	$\sum_{i=1}^n x_i^2 = 3,61E+10$	
2,5	$\sum_{i=1}^n x_i^2 = 2,34E+07$	$\sum_{i=1}^n x_i^4 = 5,95E+13$	2,4	$\sum_{i=1}^n x_i^2 = 2,34E+07$	$\sum_{i=1}^n x_i^4 = 5,95E+13$	2,4	$\sum_{i=1}^n x_i^2 = 2,34E+07$	$\sum_{i=1}^n x_i^4 = 5,95E+13$	0
5			4,3			3,9			125
6,9			5,4			4,6			250
8			5,9			5,4			375
9	$\sum_{i=1}^n y_i = 2,64E+02$	$\sum_{i=1}^n x_i y_i = 3,48E+05$	6,9	$\sum_{i=1}^n y_i = 1,90E+02$	$\sum_{i=1}^n x_i y_i = 2,46E+05$	5,6	$\sum_{i=1}^n y_i = 1,58E+02$	$\sum_{i=1}^n x_i y_i = 2,02E+05$	500
10,5			7,5			6,6			625
12	$\sum_{i=1}^n x_i^2 y_i = 5,34E+08$	$\beta_0 = 3,72E+00$	8,4	$\sum_{i=1}^n x_i^2 y_i = 3,76E+08$	$\beta_0 = 3,24E+00$	7,4	$\sum_{i=1}^n x_i^2 y_i = 3,08E+08$	$\beta_0 = 3,09E+00$	750
13,1		$\beta_1 = 9,12E-03$	9,3		$\beta_1 = 5,97E-03$	8		$\beta_1 = 4,60E-03$	875
14,6		$\beta_2 = 1,97E-06$	10,7		$\beta_2 = 1,42E-06$	8,7		$\beta_2 = 1,17E-06$	1000
16,3	$\Delta = 2,05E+20$	$\Delta_1 = 1,87E+18$	11,9	$\Delta = 2,05E+20$	$\Delta_1 = 1,22E+18$	9,6	$\Delta = 2,05E+20$	$\Delta_1 = 9,43E+17$	1125
17,5	$\Delta_0 = 7,64E+20$	$\Delta_2 = 4,05E+14$	12,5	$\Delta_0 = 6,65E+20$	$\Delta_2 = 2,92E+14$	10,6	$\Delta_0 = 6,34E+20$	$\Delta_2 = 2,41E+14$	1250
19,8			14			11,3			1375
21,9			15,4			12,5			1500
23,5			16,8			13,5			1625
25,5			17,9			15			1750
28			19,6			15,9			1875
30,3			21			17,1			2000
Прогнозируемые утечки, см ³ /мин			Прогнозируемые утечки, см ³ /мин			Прогнозируемые утечки, см ³ /мин			Прогнозируемая наработка тракторов, мото-час
32,0			22,4			18,2			2125
34,2			23,9			19,4			2250
36,5			25,5			20,6			2375
38,8			27,1			21,9			2500
42,2			29,4			23,8			2675
43,7			30,4			24,6			2750
46,2			32,2			26,0			2875
48,8			34,0			27,4			3000
51,5			35,8			28,9			3125
54,2			37,7			30,4			3250
57,0			39,6			32,0			3375
59,8			41,6			33,6			3500
62,7			43,6			35,2			3625
65,7			45,7			36,8			3750
68,7			47,8			38,5			3875
71,8			49,0			40,3			4000