РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

На правах рукописи

Авилов Виктор Владимирович

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ТРИБОСИСТЕМ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ

Специальность 2.5.3 – Трение и износ в машинах

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН

Колесников Игорь Владимирович

Ростов-на-Дону

2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 5

Глава 1. Обзор и анализ исследований в области повышения износостойкости тяжелонагруженных трибосистем подвижного состава 13

1.1 Конструкция и особенности работы трибосопряжения «пятник – подпятник» подвижного состава и методы повышения его износостойкости 13

1.2 Формирование поверхности трибоконтакта путем нанесения износостойких покрытий методом электроискрового легирования (ЭИЛ) ... 16

1.3 Анализ и перспективы использования пластичных смазочных композиций с присадками в тяжелонагруженных трибосистемах 23

1.4 Выводы и задачи исследования 34

Глава 2. Влияние электроискрового легирования в составе жидких сред на структурно-фазовые изменения, физико-механические и трибологические характеристики модифицированного слоя 35

2.1 Методика проведения экспериментальных исследований поверхности, модифицированной методом ЭИЛ в жидких средах 37

2.2 Исследование микроструктуры модифицированной поверхности образцов, прошедших электроискровое легирование в жидких средах 40

2.3 Исследование физико-механических характеристик образцов, подвергнутых электроискровому легированию в жидких средах 44

2.4 Исследование триботехнических характеристик образцов, модифицированных электроискровым легированием в жидких средах 47

2.5 Выводы по главе 2 53

Глава 3. Исследование морфологии, элементного и химического состава поверхностных структур образцов, прошедших модификацию методом ЭИЛ в жидких средах 55

3.1 Исследования химической связи поверхностных пленок в узле трения с помощью рентгеноэлектронной спектроскопии 55
3.2 Исследования морфологии и элементного состава поверхностей образцов, обработанных ЭИЛ в жидких средах 61
3.3 Квантово-химический анализ диффузионных процессов вольфрама и углерода в стальное контртело и расчет энергии их связи с металлическим контртелом 68
3.4 Выводы по главе 3 75
Глава 4. Трибологические исследования влияния присадки двойного метафосфата кальция и цинка, никеля и цинка на износостойкость узла трения в широком диапазоне нагрузок и скоростей 76
4.1 Синтез неорганических присадок двойных метафосфатов кальция и цинка, никеля и цинка 77
4.2 Исследование влияния процентного содержания присадки и нагрузочно-скоростных режимов на величину износа трибосистемы 86
4.3 Оценка эффективности разработанных присадок – двойных метафосфатов – к пластичным смазочным материалам в условиях динамических нагрузок 95
4.3.1 Многофункциональная машина трения для динамических испытаний и результаты трибологических параметров при осевом и радиальном нагружении 96
4.4 Выводы по главе 4 106
Глава 5. Внедрение разработанной технологии электроискрового легирования с использованием пластичных смазочных материалов с метафосфатными присадками в пятниковом узле грузового вагона 107
5.1 Стендовые испытания материалов узла «пятник – подпятник» грузового вагона подвижного состава 110
5.2 Эксплуатационные испытания материалов узла «пятник – подпятник» грузового вагона подвижного состава 119

5.3 Выводы по главе 5 125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 128
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Акты о внедрении результатов научных исследований в вагонном ремонтном депо..... 151
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Варианты исполнения многофункциональной машины трения ……..... 154
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Особенности трибологического узла многофункциональной машины трения для исследования электрических явлений на трибоконтакте 155
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Результаты испытаний смазочной композиции БУКСОЛ при нагрузке в 300 кН 156
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 Схема установки модифицирования поверхности подпятника 159

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностный слой в узлах трения транспортных систем, машин и механизмов является ответственным за их надежную и безопасную работу. От способности поверхностного слоя переводить трибосистему в режим самоорганизации зависит ее износостойкая работа. Практика показала, что среди технологических, материаловедческих методов повышения износостойкости поверхностного слоя трибосопряжения наиболее перспективны: для металлических трибосистем – всевозможные методы модификации поверхности, среди которых наиболее простой и широко используемой для обработки металлических изделий является технология электроискрового легирования, а для трибосопряжений, работающих со смазочными материалами – синтез технологий и материалов, позволяющих получить на поверхности трибоконтакта вторичные структуры – пленки переноса. Однако в сфере инженерии поверхностей отсутствует учет взаимного влияния электрофизических и химических процессов в зоне трения, который позволил бы получить более полную и адекватную модель механизма изменения структуры и свойств формируемого покрытия.

Большинство тяжелонагруженных трибосистем работает в условиях граничного трения, при котором в зонах фактического касания смазочная пленка изнашивается (вследствие механохимических и деструкционных процессов) и затем восстанавливается за счет адсорбции, диффузии, электростатического и ван-дер-ваальсова взаимодействия. Поэтому раскрытие механизма и кинетики образования вторичных структур в металлических трибосистемах при наличии смазок позволит эффективно осуществить поиск присадок в смазку, способствующих направленному изменению свойств поверхности трибоконтакта.

Актуальность темы исследования. Внимание к проблемам трения и изнашивания вызвано значительным износом трибосопряжений в связи с интенсификацией производства, большими скоростями и нагрузками транспортных средств, машин и механизмов. Научный поиск путей повышения противоизносной эффективности направлен на изменение структуры и состояния поверхностного

трибослоя, обладающего способностью приспосабливаться к изменяющимся условиям эксплуатации. Практика показывает, что для обеспечения надежной, безопасной работы транспортных средств необходимо в первую очередь обеспечить высокую износостойкость узлов трения.

Одним из способов упрочнения поверхности трения является технология электроискрового легирования (ЭИЛ), позволяющая повысить физико-механические и трибологические характеристики обрабатываемой поверхности и не требующая спецоборудования. Однако следует указать на то, что ЭИЛ в газовой среде приводит к окислительным процессам, что снижает эксплуатационные характеристики.

Поэтому весьма актуальной является разработка методов электроискровой обработки металлических поверхностей трения не в газовой среде, а в жидких средах, связанных с созданием на трущихся трибоконтактах модифицированных покрытий, работающих в условиях граничного трения и обладающих свойствами саморегулирования.

В настоящее время разработано достаточно большое количество технологий создания на трибоповерхностях деталей машин и механизмов модифицированных покрытий. Основными недостатками этих методов является слабая адгезия покрытий с материалом поверхностного слоя и отсутствие должного внимания к разработке методики оценки работоспособности поверхностных слоев узлов трения при наличии пластичных смазок.

Поэтому весьма перспективными являются исследования по повышению износостойкости тяжелонагруженных трибосистем путем комбинированного метода – модифицирования поверхности трения с помощью электроискрового легирования в жидких средах, исключающих образование окисной пленки, и разработки эффективных присадок к пластичным смазочным материалам.

В этом случае особое внимание следует уделить созданию рациональной шероховатости на трущихся поверхностях, обеспечивающей использование впадин поверхности в качестве микрорезервуаров для смазочных материалов.

Об актуальности и важности таких исследований говорит то, что они были поддержаны грантами Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-08-00264); Российского научного фонда (проекты РНФ № 16-19-10467, № 21-19-00288).

Степень разработанности проблемы. В настоящее время существует множество методов воздействия на поверхность трибоконтакта, упрочняющих поверхность и изменяющих структуру и химический состав поверхностного слоя. Среди них можно выделить исследования ученых: С. В. Шишкина, П.Н. Хопина, Б. С. Натапова, Н. С. Герасимовой, А. Ю. Некрасова, И. И. Новикова, В. А. Роша, В. В. Уварова, G. Xu, M. Kutsuna, Z. Liu, H. Zhang, А. В. Киричека. Однако в них отсутствуют сведения о механизме образования антифрикционных пленок на трибоконтакте при наличии смазочного материала и модифицированного поверхностного слоя. Что касается рациональной шероховатости на поверхности трущихся сопряжений, то вопрос выбора технологий и методов их использования в качестве микрорезервуаров для смазочных материалов на поверхности сопрягаемых узлов трения с целью повышения их износостойкости остается открытым.

Теоретические и экспериментальные работы в области исследования смазочных материалов активно ведутся, как в России, так и за рубежом. Это работы коллективов академиков РАН РФ: И. Г. Горячевой, В. Е. Панина, Е. Н. Каблова, В. И. Колесникова; профессоров – С. В. Федорова, С. Н. Захарова, В. И. Бутенко, Ю. К. Машкова, Е. А. Памфилова, Г. И. Шульги, О. Ю. Елагиной, В. Э. Бурлаковой и др.; в Республике Беларусь – это школы В. А. Белого, А. И. Свириденка, Н. К. Мышкина. В научные исследования по изучению условий работы трибосистем при наличии смазочных материалов большой вклад внесли следующие ученые: А. С. Кужаров, И. А. Буяновский, Р. М. Матвеевский, Г. И. Фукс, В. В. Синицын, Б. П. Тонконогов и др., работы которых посвящены поиску присадок, модифицированию масел с целью улучшения трибологических характеристик. В работах Б. И. Костецкого, Л. И. Бершадского, И. С. Гершмана, Н. А. Буше приведены результаты

исследований по самоорганизации при трении на основе изучения образования поверхностных вторичных структур. Вместе с тем в данных работах отсутствуют исследования по созданию рациональной шероховатости, моделирующей образование резервуаров, исключающих режим голодания пластичных смазок.

Электроискровое легирование, предложенное более 70 лет назад супругами Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко и основанное на электрической эрозии и переносе материала от электрода (анода) на изделие (катод), к настоящему времени развивается в основном в экспериментальном плане. В силу многофункциональности протекающих при ЭИЛ физико-химических процессов, зависящих от большого количества параметров: частоты, амплитуды, скважности токов искрового разряда, материала электрода и изделия, состава межэлектродной среды, расстояния между электродом и деталью, – весьма полезно иметь модель такого влияния на физико-механические и трибологические характеристики трибосистем, подверженных ЭИЛ.

Что касается теоретических исследований метода ЭИЛ, то помимо работ Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко, Г. П. Иванова, В. Б. Тарельник, А. Д. Верхотурова, С. В. Николенко успешное его развивали Ю. К. Машков, Д. Н. Катаев в трудах по выяснению термодинамических подходов к управлению процессами ЭИЛ.

Объектом исследования выбран один из самых тяжелонагруженных узлов трения подвижного состава – «пятник – подпятник» грузового вагона. Для данного трибосопряжения была проведена лабораторная, стендовая и эксплуатационная проверка установленных в работе закономерностей для комбинированного метода модификации поверхности трения с применением электроискрового легирования и разработанной технологии синтеза присадок к пластичным смазочным материалам.

Предметом исследования являются разработка и создание технологий модифицирования металлической поверхности электроискровым легированием, обеспечивающим высокую износостойкость и упрочнение трибосистемы за счет диффузионных процессов, а для смазочных материалов – разработка

противоизносных присадок к ним, обеспечивающих образование вторичных структур в узле трения.

Цель работы и задачи исследований. Целью исследования является повышение износостойкости тяжелонагруженных трибосистем на основе комплексного подхода, включающего в себя модификацию контактных поверхностей трибосопряжения и синтез присадок к пластичным смазочным материалам. Для реализации цели работы необходимо решить следующие задачи:

– разработка методов модификации поверхностных слоёв трибосопряжения электроискровым легированием в жидких средах с обеспечением необходимой шероховатости, исключающей режим плёночного голодания пластичных смазок;

– повышение триботехнических свойств смазочных материалов на основе их модификации присадками метафосфатного состава и установление механизма их действия;

– установление механизма упрочнения контактных поверхностей трибосопряжений и повышение их износостойкости на основе квантово-химических расчетов энергии связи и анализа диффузионных процессов вольфрама и углерода в стальное контртело;

– проведение сравнительной оценки результатов лабораторных, стендовых и динамических испытаний, а также эксплуатационной проверки установленных закономерностей для комбинированного метода модификации поверхности трения.

Положения, выносимые на защиту:

1 Комбинированный метод модифицирования поверхности трения тяжелонагруженных трибосистем, включающий электроискровую обработку поверхности в жидких средах и введение неорганических присадок двойных метафосфатов в пластичные смазочные материалы,

2 Результаты исследований по определению влияния режимов ЭИЛ и межэлектродной среды (индустриальное масло И-40 и полиэтилсилоксановая жидкость) на формирование модифицированной поверхности трения и ее влияния на прочностные и противоизносные характеристики.

3 Результаты изучения механизма смазочного действия присадок $CaZn(PO_3)_4$ и $NiZn(PO_3)_4$ путем образования антифрикционных пленок на поверхности трения.

4 Результаты физико-механических и трибологических исследований смазочных материалов с присадками $CaZn(PO_3)_4$ и $NiZn(PO_3)_4$ и подготовленной поверхности трения с помощью электроискрового легирования в жидких средах. С учетом установленных закономерностей влияния плёнок переноса на трибологические характеристики получено увеличение срока работоспособности смазочного материала.

Научная новизна заключается в том, что:

1 Установлены закономерности влияния технологических режимов обработки поверхности, полученной с помощью электроискрового легирования в жидких средах, на физико-механические и трибологические характеристики трибосистем.

2 На основе квантово-химических расчетов проведена оценка энергии межатомного взаимодействия железа с различными элементами при электроискровом легировании, что позволило сделать выбор материала для электрода при модифицировании поверхности трения.

3 Установлена и подтверждена расчетами энергии связи фрагментов молекулы с железом эффективность присадок двойных метафосфатов $CaZn(PO_3)_4$ и $NiZn(PO_3)_4$ к смазочным материалам, обеспечивающая образование пленок переноса на поверхности трения.

4 Представлен механизм формирования упрочняющего слоя методом электроискрового легирования как внутри модифицированной детали, так и на ее поверхности за счет испарения и ионизации атомов вольфрамового электрода (катода) и деструкции «изолирующей жидкости» с выделением углерода и последующим образованием карбидного слоя WC, реализующих дисперсионный механизм упрочнения стали.

Теоретическая значимость работы

1 Установлено, что предложенный комбинированный метод модифицирования поверхности трения обеспечивает исключение пленочного голодания и повышение физико-механических и трибологических характеристик трибосистемы. Для использования этого метода необходимы:

а) подготовка рациональной шероховатости поверхности трибоконтакта с помощью электроискрового легирования;

б) синтез двойных метафосфатов в качестве добавки к пластичным смазкам и оценка эффективности образования антифрикционных пленок переноса путем использования физико-математического моделирования и планирования эксперимента.

2 На основе квантово-химических расчетов энергии связи поверхности трения с фрагментами молекул присадок $CaZn(PO_3)_4$ и $NiZn(PO_3)_4$ показана эффективность присадок двойных метафосфатов к пластичным смазкам в повышении изнсостойкости трибосопряжения за счет высокой степени полимеризации и структурного встраивания полимерных молекул в рельеф поверхности трибоконтакта.

3 Показано, что при трении модифицированной вольфрамом поверхности металлического контртела за счет термомеханодеструкции в зоне контактирования выделяются атомы вольфрама, которые замещают атомы Fe в узлах кристаллических решеток феррита, делая его легированным твердым раствором $Fe_{\alpha}(W)$ и тем самым достигается упрочняющий эффект поверхности трисопряжения.

Практическая значимость исследований:

1 Определены параметры обработки поверхности методом ЭИЛ и обоснован выбор материалов и сред при получении «микрорезервуаров», исключающих пленочное голодание пластичных смазочных материалов.

2 Разработана технология получения пластичных смазочных материалов с присадками двойных полифосфатов. Исследования завершены лабораторной, стендовой и эксплуатационной проверкой разработанных присадок и внедрением их в реальный узел подвижного состава «пятник – подпятник».

Достоверность и обоснованность научных результатов. Выполненные исследования базируются на использовании современных физических методик – квантово-химических расчетах энергии связи, математической статистики и результатов многофакторного планирования эксперимента, и подтверждены сходимостью с эксплуатационными результатами.

Апробация работы. Основные положения настоящего исследования обсуждались на международных научно-практических конференциях: 8-й Международной научно-практической конференции «Телекоммуникационные, информационные и логистические технологии на транспорте (ТелекомТранс-2011)» (Ростов-на-Дону, 2011 г.); Международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология (ПолиКомТриб-2013)» (Гомель, 24–27 июня 2013 г.); всероссийских и международных научно-практических конференциях «Транспорт-2011–2020» (Ростов-на-Дону, 2011–2020 гг.). Результаты выполненных исследований докладывались и обсуждались на совместных заседаниях кафедр «Теоретическая механика» и «Транспортные машины и триботехника» ФГБОУ ВО РГУПС.

Публикации. Результаты исследований и содержание работы опубликованы в 43 печатных работах, из них 16 – в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, 4 – входящих в международные базы цитирования – Scopus и Web of Science, 3 патента РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, включающего в себя 188 наименований, и 5 приложений. Работа изложена на 160 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков, 9 таблиц.

Глава 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ТРИБОСИСТЕМ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Одним из важнейших факторов, обеспечивающих безопасность функционирования подвижного состава, является износостойкость таких тяжелонагруженных трибосистем, как «колесо – рельс», «пятник – подпятник», шлицевых соединений карданных валов приводов вагонных генераторов и др. Поскольку решение поставленных в диссертации задач будет продемонстрировано на примере повышения износостойкости трибосопряжения «пятник – подпятник» подвижного состава, то необходимо показать особенности работы и методы повышения долговечности узла трения «пятник – подпятник».

1.1 Конструкция и особенности работы трибосопряжения «пятник подпятник» подвижного состава и методы повышения его износостойкости

Одним из основных элементов в конструкции грузового вагона является узел «пятник – подпятник», расположенный на надрессорной балке тележки 18-100 (рисунок 1.1).

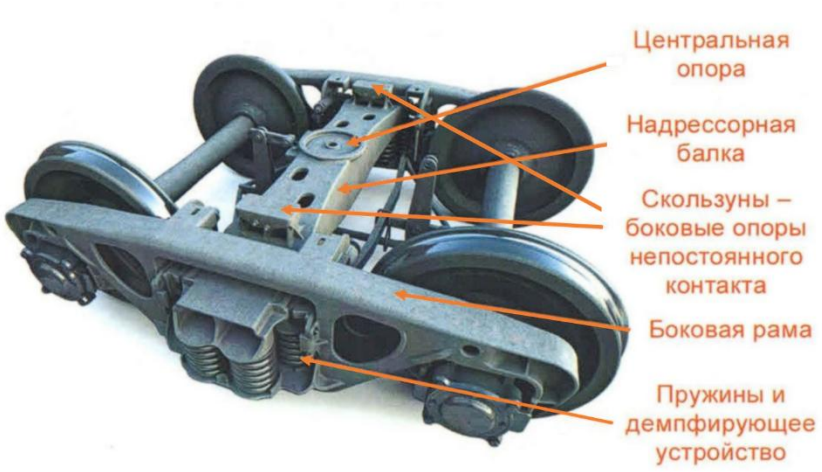


Рисунок 1.1 – Тележка ЦНИИ Х3 модели 18-100. В центре центральной опоры расположен подпятник с буртиками, на который опирается пятник кузова вагона, а между ними – разделительные прокладки

При движении вагона, опирающегося на подпятник, возникают колебания, а при прохождении его в кривой части пути движения за счет этого трибосопряжения происходит поворот тележек относительно кузова. При движении вагона как в прямых, так и в кривых участках пути гашение колебаний и поворот тележек относительно кузова обеспечиваются силами трения в сопряжении «пятник – подпятник». На преодоление трения затрачивается сила тяги локомотива. Известны технические решения, направленные на уменьшение сил трения в трибосистеме «пятник – подпятник», а в итоге – и на снижение энергозатрат на тягу поездов [1].

Основные направления модернизации пятникового узла детально исследованы в работах [2–12], где предложены различные конструкции этого узла, всевозможные виды модификации поверхностей трения с целью повышения износостойкости; наиболее распространенным решением стало использование разделительных прокладок между пятником и подпятником. Однако реализация всех предложенных мероприятий не находит широкого применения из-за большого разнообразия типов и моделей вагонов, что приводит к усложнению обслуживания и ремонта. Кроме того, реализация этих предложений на местах, в вагонных хозяйствах, увеличивает эксплуатационные расходы на обслуживание и является весьма затруднительной из-за отсутствия технической оснастки.

Для повышения износостойкости оказалось перспективным использование в рассматриваемом узле смазки, но в процессе эксплуатации смазка выдавливается, и узел работает в режиме сухого трения. Поэтому, как и отмечено нами выше, поиск научных и технических решений повышения износостойкости трибосопряжения «пятник – подпятник» является весьма актуальным.

На основе анализа существующих предложений по повышению износостойкости трибоузла «пятник – подпятник» можно сделать вывод, что среди наиболее распространенных практических решений, направленных на снижение трения, выделяются всевозможные антифрикционные прокладки, различные пластичные смазывающие масла и др. В работе [13] проведены

исследования по оценке энергопотребления на тягу поезда при варьировании значений коэффициента трения в сопряжении «пятник – подпятник» для различных скоростей движения и радиусов кривых. Показано, что энергетические потери за счет трения в узле «пятник – подпятник» достаточно значительны. Но главная цель, как мы считаем, состоит не только в компенсации указанных потерь, но в первую очередь – в обеспечении безопасности движения. Проблема заключается в том, что требования к коэффициенту трения в рассматриваемом узле достаточно компромиссные: когда поезд движется по прямой, то коэффициент трения должен быть достаточно значимым во избежание виляния кузова вагона относительно тележки, а в кривых, наоборот, – достаточно малым для снижения энергетических потерь работы сил трения в узле «пятник – подпятник». Кроме энергозатрат, необходимо помнить об износостойкости данного узла. Для повышения работоспособности и долговечности срока службы рассматриваемого нами трибосопряжения необходимо проанализировать причины его износа и определить эффективные пути обеспечения износостойкости.

Высокие нагрузки, а также окружающая среда способствуют изнашиванию узлов трения вследствие пластической деформации [13], которая при динамических воздействиях приводит к отслаиванию материала, а в итоге – к их износу и разрушению. Механизм изнашивания вследствие пластической деформации был исследован и развит И. В. Крагельским [14], который установил влияние на этот процесс смазочного материала, окружающей среды и динамических режимов нагружения. При многократном деформировании поверхности происходит отделение ее частиц, образование микротрещин [15–20]. При этом повреждения поверхностей трения происходят при взаимодействии с окружающей средой с соответствующим образованием окислов – коррозией. В настоящее время отсутствуют исследования по эффективному выбору модифицирования поверхности трения узла «пятник – подпятник», исключающего коррозию в условиях эксплуатации. Поэтому одной из задач

нашего исследования является создание покрытий, обладающих высокими износостойкими и антикоррозионными характеристиками. Для этого нами проведены исследования метода электроискрового легирования в среде углеводородов и полиэтилсилоксановой жидкости, исключающих коррозию в условиях ЭИЛ. Помимо этого, повышение износостойкости узла «пятник – подпятник» также достигается использованием смазок с различными присадками [21–24]. При этом положительный эффект от применения смазок носит кратковременный характер из-за быстрого разрушения и удаления смазочного материала из зоны трения. Поэтому другой задачей в работе является разработка присадок к пластичным смазкам, способствующих созданию вторичных структур и прочно удерживающихся на поверхности трения. При этом предполагается, что при разработке смазочных материалов использование методов системного анализа и квантово-химического расчета позволит повысить эффективность результатов разработки смазочных материалов.

1.2 Формирование поверхности трибоконтакта путем нанесения износостойких покрытий методом электроискрового легирования (ЭИЛ)

Поскольку одной из основных задач в работе является определение влияния шероховатости поверхности на износостойкость модифицированного масляного слоя в тяжелонагруженном трибосопряжении «пятник – подпятник», то проведем анализ характеристик топографии поверхности [25–28].

Совместное использование в узле «пятник – подпятник» покрытия, нанесенного методом ЭИЛ, и пластичных смазок ставит вопрос о морфологии поверхности, полученной указанным методом. Полученная поверхность должна обеспечивать оптимальное сохранение смазочного материала в полостях, образованных после обработки.

Для конструирования таких резервуаров для смазочных материалов, что будет рассмотрено далее, в главе 2 диссертации, требуется провести анализ

шероховатости поверхности и ее волнистости. В своей монографии [14] И. В. Крагельский отмечает, что неровности на поверхности трения не только могут способствовать образованию вторичных структур на поверхности – удерживать смазочный материал, но и за счет своей разной высоты будут внедряться на разную глубину. В этой связи специалисты по трению и износу различают:

1) контурную площадь трибоконтакта – A_c, обусловленную волнистостью и приводящую к объемной деформации;
2) фактическую площадь трибоконтакта – A_r, обусловленную реальным контактированием поверхностей трения;
3) геометрическую или, как часто её называют, номинальную – A_a, обусловленную контактированием всех фактических площадок A_r.

Обработанную поверхность, по данным И. В. Крагельского [14], можно представить в виде волны с расположенными на ней контактирующими площадками.

Ценные сведения о топографии поверхностей трения представлены результатами, полученными в лаборатории Ростовского государственного университета путей сообщения. В [29] приведены и профилограмма, и спектральный график неровностей, позволяющие сделать вывод о том, что профиль поверхности можно представить суммой амплитуд и частот синусоидальных волн.

Основываясь на постулате о том, что распределение высот шероховатости подчиняется закону Гаусса, авторы статьи [29] анализируют асимметрию в распределении микронеровностей на трибоконтакте, обусловленную не только видом обработки при изготовлении, но и режимом трения. Показано, что асимметрия отражает характеристику шероховатых поверхностей, зависящую от вида и режимов механической обработки. Так, если после обработки преобладают шероховатости с достаточно острыми выступами, то имеет место положительная асимметрия, а в случае пологих выступов – отрицательная. Авторами также анализируется случайный профиль поверхности трения, который описывается функцией автокорреляции. Что же касается волнистости, то, как и шероховатость,

она зависит от механической обработки детали и ее называют технологической волнистостью. Следует отметить, что в литературных источниках встречается и технологически-эксплуатационная волнистость – в результате эксплуатации узлов трения, а также возникающая за счет термических напряжений при трении [14].

На сегодняшний день общепризнанным фактом считается, что эффективная и надежная работа пар трения зависит не только от состояния поверхности, но и от применения правильно подобранных смазочных материалов и присадок [30–43]. Указанный вывод ставит задачи повышения эффективности адгезионного взаимодействия контактирующих поверхностей со смазочным материалом. Определенные условия работы трибоузлов, в частности в режиме граничного трения при тяжелонагруженных условиях, требуют обоснования по выбору наиболее эффективного способа и режимов обработки поверхностей, поиску, созданию и применению новых смазочных материалов [44–49]. И. В. Крагельский, Н. В. Гитис [50] обнаружили зависимость смазочной способности от состояния рельефа поверхности и смазочного материала, и в проведенных исследованиях указывали на склонность пластичных смазочных материалов к пленочному голоданию. Выход из этой зависимости видится нам в создании микрорезервуаров для смазочных материалов с помощью технологических методов обработки поверхности трения.

Следовательно, необходимо проводить исследования по созданию оптимального рельефа на поверхностях трения, а также разработке высокоэффективных смазочных материалов и выяснению механизма молекулярного взаимодействия присадок с поверхностью.

В настоящее время существует множество методов поверхностного упрочнения, которые можно разделить на несколько основных групп: это, во-первых, образование тонких пленок на поверхности, во-вторых, энергетические методы, изменяющие структуру и химический состав поверхностного слоя, в-третьих, механическое воздействие, термообработка и другие методы [44, 45].

Технологические методы повышения износостойкости деталей отмечены авторами П. Н. Хопиным, С. В. Шишкиным [45] следующей классификацией:

1 Термическая и химическая обработка: закалка, отпуск, цементация, азотирование, цианирование, термодиффузионное хромирование, сицилирование.

2 Электрохимические (гальванические) покрытия: хромирование, анодирование.

3 Поверхностно-пластическое деформирование (ППД): алмазное выглаживание, обкатка шариками и роликами, галтовка, обдувка дробью, ультразвуковое упрочнение.

4 Газотермическое напыление: газопламенное, высокоскоростное газопламенное, плазменное, детонационное, электродуговое.

5 Напайка и наплавка: газопламенная, плазменная, аргонно-дуговая, индукционная, контактная.

6 Физико-химические методы нанесения покрытий: физические методы нанесения покрытий (PVD-методы), химические методы нанесения покрытий (CVD-методы).

Каждый метод обладает особенностями и применяется для решения определенных задач.

Традиционно широко используется термическая и химико-термическая обработка [51–55]. Закалка связана с диаграммой состояния сплавов железа с углеродом и в зависимости от фазовых изменений структур стали бывает аустенитного, мартенситного (мартенсит – основа закаленной стали) и мартенситно-ферритного вида. Основные недостатки методов закалки: деформация деталей из-за действия остаточных напряжений, образование окислов (окалины), обезуглероживание поверхности [45, 56], возможно образование закалочных трещин [57]. Деформация металла возрастает с увеличением температуры нагрева и скорости охлаждения [58]. Отклонения от равновесных состояний, вызванные различными технологическими процессами, устраняются нагревом и выдержкой при определенной температуре – отжигом первого рода (отжиг литых металлов гомогенизационный (диффузионный); рекристализационный отжиг холоднодеформированных металлов; отжиг,

уменьшающий остаточные напряжения в металлах). Гомогенизационный отжиг характеризуется большой длительностью, легированные стали нагреваются до температур 1150 °С с выдержкой 12…16 ч, затем подвергаются охлаждению в течение 6 ч с печью, затем на воздухе, такой способ обработки является дорогостоящим процессом [59].

Химико-термическая обработка (ХТО) поверхности использует термическую диффузию для включения неметаллических или металлических атомов в поверхности материала для изменения его химического состава и микроструктуры [52, 60]. Процесс проводится в твердой, жидкой или газообразной среде с одним или несколькими одновременно активными химическими элементами. Для большинства термохимических обработок механизм включает разложение твердых, жидких или газообразных частиц, расщепление газообразных молекул с образованием зарождающихся атомов, поглощение атомов, их диффузию в металлическую решетку и реакции внутри структуры подложки для модификации существующих или образования новых фаз. К достоинствам данного вида поверхностного упрочнения следует отнести независимость от внешней формы изделия, возможность устранить последствия перегрева при ХТО последующей термической обработкой. Недостаток же состоит в том, что вся деталь подвергается воздействию высоких температур, поверхностная диффузия накладывается на изменения в объеме материала, которые при некоторых обработках могут включать фазовые превращения, и это усложняет процесс [59].

Распространенным методом упрочнения поверхности при финишной обработке деталей для создания наклепанного поверхностного слоя высокой твердости [61–69] является и поверхностно-пластическое деформирование (ППД). Как отмечают авторы А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев [62], энергия ударных импульсов может варьироваться в пределах 5…200 Дж, а особенность способов ППД заключается в том, что они не требуют значительных энергетических затрат и сложного оборудования. Однако сложно управлять ударами при

упругопластическом деформировании, так как энергия пластической деформации может быть разной и трудно предсказать результаты упрочнения. При этом разработаны способ и технология многопереходной обработки поверхностей трения со смазочными микрокарманами [63]. Технологические возможности ППД позволяют получать гетерогенные структуры упрочнения с чередованием участков высокой и низкой твердости [64 - 67]. Ведутся исследования в области применения технологий комбинированного упрочнения, применения ППД совместно с химико-термической обработкой [65, 68], применения ультразвуковых колебаний [66], проведения комплексной оценки характеристик изменений первоначальной геометрии деталей (коробление) с превышением нормативных технологических допусков [69].

Для упрочнения и ремонта деталей, в том числе и деталей двигателей, самолетов, автомобилей (поршневых колец, плунжерных пар топливных насосов, пресс-форм, штампов, измерительных и режущих инструментов), широко используются электрохимические (гальванические) покрытия, обеспечивающие восстановление износа до 0,2 мм. Преимущества гальванического хромирования: повышение износостойкости закаленной стали в 2…5 раз, твердости – до 450…100 НВ, хорошая адгезия к поверхности, химическая стойкость. Недостатки: высокая стоимость и энергоемкость процесса, малая производительность. Применяется и электрохимический процесс нанесения защитной пленки окиси Al – анодирование [56]. В мировой практике ведутся исследования в области коррозии для оценки срока службы полимерных пленок. Для защиты от коррозии были предложены два механизма: один – физический барьерный эффект, а другой – анодная защита. Что касается барьерного эффекта, то полимерное покрытие действует как барьер для проникновения окислителей и агрессивных анионов, защищая металлы подложки. Этот эффект аналогичен лакокрасочному покрытию, которое препятствует проникновению веществ в сталь подложки. При анодной защите проводящий полимер с сильными окислительными свойствами работает как окислитель к стали подложки, потенциал которой смещен к потенциалу в

пассивном состоянии [70]. Обзор основных электрохимических методов, используемых для определения характеристик защитных покрытий, показывает, что глубокие структурные знания в сочетании с электрохимическим анализом являются ключевыми факторами при разработке высокоэффективных покрытий. Необходим междисциплинарный подход для получения эффективного барьера с химической, механической и термической стабильностью, ингибированием коррозии, способностью к самовосстановлению и другими желаемыми свойствами. Однако прогнозирование коррозии остается сложной задачей как для теоретических, так и для экспериментальных исследований [71].

С целью устранения склонности пластичных смазочных материалов к пленочному голоданию предлагается использовать комбинированный метод электроискрового легирования (ЭИЛ) с применением модифицированных смазочных материалов, с помощью которого можно получить свойства двухкомпонентного покрытия, износостойкость и антифрикционность. К основным достоинствам ЭИЛ относится возможность локального нанесения покрытий. Покрытия, как показали наши исследования [154, 155], наносимые этим методом, характеризуются высокой адгезией покрытия с подложкой без ее предварительной подготовки, возможностью изменения состава покрытия в широких пределах, создания поверхности с требуемым уровнем шероховатости для нанесения последующих функциональных слоев покрытия. Неоспоримыми преимуществами метода ЭИЛ являются его универсальность и простота обслуживания оборудования, позволяющие наносить покрытия вне специализированного участка [72–80].

Кроме того, данный процесс сопровождается изменением свойств обрабатываемой поверхности: увеличением износоустойчивости, коррозионной стойкости; способствует снижению схватывания при трении (А. Е. Гитлевич и др. [81]). Формируемый слой на поверхности может варьироваться в пределах 0,01…0,12 и 0,15…0,2 мм и более с определенной шероховатостью. Основополагающими факторами физико-химических процессов, происходящих в

поверхностном слое, и конечный результат качества покрытий в основном зависят от режимов нанесения, материалов и состава применяемых электродов [82–88].

В работе проведены исследования по использованию вольфрамового электрода в процессе электроискрового легирования (ЭИЛ) и, во избежание эрозии электрода, с применением индустриального масла И-40 и полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-3 в качестве межэлектродной среды, исключающей образование окисной пленки. В процессе эксперимента были проведены исследования физико-механических и трибологических характеристик образцов, обработанных методом ЭИЛ в жидких средах, а также влияния жидкой фазы на формирование модифицированной поверхности при ЭИЛ методом ИК-спектроскопии и рентгеноэлектронной спектроскопии.

1.3 Анализ и перспективы использования пластичных смазочных композиций с присадками в тяжелонагруженных трибосистемах

История трибологии на всем протяжении своего развития неразрывно связана с успехами по созданию смазочных материалов, и сегодня благодаря достижениям квантовой и экспериментальной физики, прежде всего рентгеноэлектронной и оже-электронной спектроскопии (РЭС и ОЭС), термодинамических подходов наука о трении выходит на микро- и наноуровень [89–92].

Действительно, химическая активность атомов служит причиной развития каталитической способности металлических поверхностей, явлений адгезии и сорбционных процессов, что способствует образованию пленок, создаваемых смазочным материалом при контакте с поверхностным слоем металла.

При этом пластическая деформация сопровождается выделением теплоты с последующим образованием горячих зон, особенно при адиабатическом процессе и в небольшом объеме, высокое удельное давление и температура в локальной зоне трения способны разрушать образовавшуюся пленку. Например, масляная пленка разрушается при относительно невысоком нагревании, всего до температуры около 160…220 °С. Изображение формы и структуры пленки,

представленное на рисунке 1.2, показывает, что такой характер неоднородности пленки требует объяснения и дальнейшего исследования механизма ее образования и разрушения в процессе граничного трения.

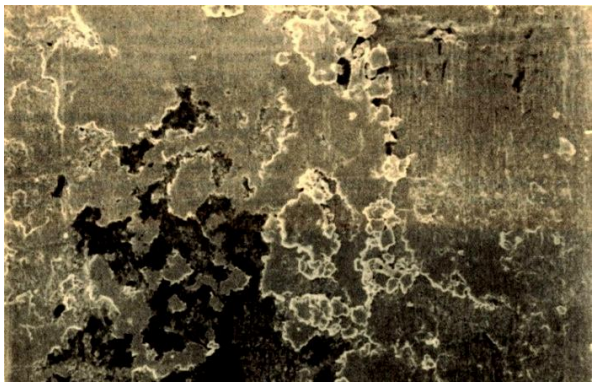


Рисунок 1.2 – Образование «плёночных структур» [93]

Устранение сближений поверхностей с помощью смазочных материалов (смазки) приводит к уменьшению трения и молекулярного взаимодействия в зоне трибоконтакта [94]. Однако работа трибосопряжений в условиях граничной смазки характеризуется режимами, при которых разделение поверхностей трения слоем смазочного материала происходит непостоянно, особенно при изменении скорости и удельных нагрузок [95]. Например, максимальный износ деталей и механизмов происходит при пуске – остановке.

В настоящее время известны газообразные, твердые, жидкие и пластичные смазочные материалы. На рисунке 1.3 представлены виды смазки и классификации их действия.

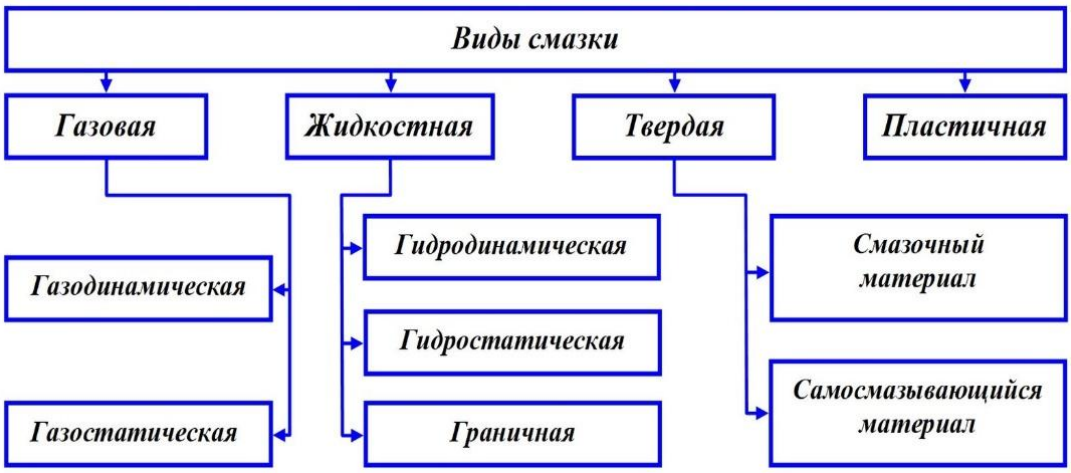


Рисунок 1.3 – Виды смазки [94]

В нашей работе внимание обращено на пластичные смазки (ПС), которые обладают определенными особенностями, достоинствами и недостатками.

Основные особенности и достоинства пластичных смазочных материалов (ПСМ). Существует два терминологических определения пластичных смазок. Первое характеризует их как дисперсную (коллоидную) систему. Второе определение характеризует пластическую деформацию твердого тела при определенной нагрузке с последующим восстановлением при снятии нагрузки, это твердая среда (загуститель). Частицы загустителя имеют малые размеры (0,1…10 мкм) и разную форму (рисунок 1.4) [96], должны обладать способностью к агрегированию с образованием легко разрушающихся и восстанавливающихся связей. В этом заключаются преимущества при высоких нагрузках и малых скоростях, ударных нагрузках при периодической работе и частых остановках механизмов, которые связаны как с пластичностью смазок, так и с большим периодом релаксации [97–104].

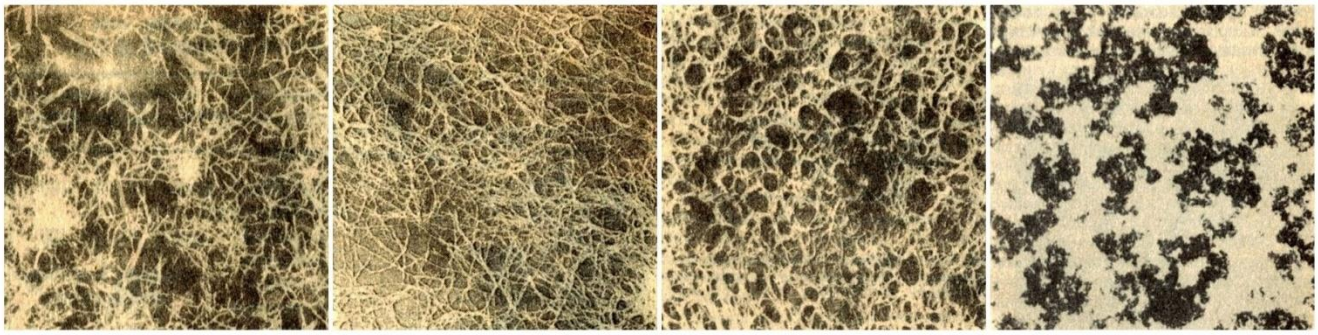


Рисунок 1.4 – Структуры дисперсной среды:
1 – кальциевое мыло; *2* – литиевое мыло; *3* – натриевое мыло;
4 – силикагель в качестве загустителя

Как показывают исследования, а также практический опыт производства и применения ПСМ, загуститель не только влияет на основные физико-химические свойства (вязкость, коллоидная стабильность, пенетрация), но и может изменять трибологические свойства, в основном такая зависимость обусловлена процентным содержанием и разновидностью загустителя [105–107].

ПСМ выпускаются в меньшем объеме по сравнению с жидкими маслами, однако перечень узлов трения, в которых применяются пластичные смазки (ПС), значителен [96, 106–120]. Малый расход ПС открывает возможности для широкого их использования, а ценные эксплуатационные свойства делают их весьма перспективными.

Как правило, срок службы ПС выше масел. ПС эффективны при работе в широком интервале температур: от – 60 до +150 °С и выше (обусловлено малой зависимостью их вязкости от температуры) [120].

ПСМ способны проявлять свойства двух видов смазки: жидкостной и твердой.

В других случаях нетекучесть (высокая вязкость) является несомненным преимуществом ПС перед маслами, благодаря наличию предела прочности смазка способна удерживаться в узлах трения и механизмах, что способствует упрощению конструкций трибоузлов [121] и допускает возможность свободно располагать механизм в пространстве.

Основные недостатки ПСМ. В связи с неспособностью пластичных смазок активно охлаждать узлы трения применение их в узлах с интенсивным тепловыделением представляет определенную трудность.

В некоторых случаях ПС могут ухудшать способность удерживаться в узлах трения (окислительное разупрочнение, вымывание водой, выделение дисперсионной среды и т. д.).

При изготовлении некоторые ПСМ могут применяться алкилбифенилы (4-метил-, 4,4′-*ди*-метил-, 4-*трет*-бутилфенилы), которые хоть и обладают стабильностью к окислению [122], но при воздействии высоких температур и продолжительном хранении подвержены химической деструкции [123] и тем самым проявляют склонность к пленочному голоданию [50].

В мировой практике все чаще применяют и высокотемпературные бентонитовые смазки, работающие в широком интервале температур. Использование органобентонитов в качестве загустителей технически и

экономически оправдано, в отличие от природных жиров и других дефицитных материалов, применяемых при производстве смазок на мыльных загустителях [125].

Существует множество трудов, где представлено наиболее точное описание пластичных смазочных материалов (ПСМ): химический состав, основные свойства, предположительный механизм смазочного действия и прочие характеристики [97–125]. Однако вопросы их создания, такие как выбор новых присадок, добавок, компонентов, в том числе дисперсионных сред, и применения их в ПСМ остаются актуальной темой исследований [126, 127].

Следует отметить, что природа и свойства масла, добавки и присадки, способы производства могут существенно изменять свойства смазок на одном и том же загустителе.

На сети железных дорог РФ используется широкий ассортимент различных смазочных материалов (СМ) [128], в том числе и пластичных. В настоящее время наибольшее распространение получили КР-400, ПУМА-МР, ПУМА-МЛ, ПУМА-МГ, СРК, РС-6 «В», РС-6 «Ву», СПЛ, СС-1, РАПС-2.

В трибосопряжении «пятник – подпятник» применяются смазки «Солидол-Ж», графитная ГОСТ, графитная ТУ, КТСМ. Но, как показывает практический опыт вагоноремонтных депо, возможно использование и других ПСМ, что, видимо, объясняется их схожими физико-химическими свойствами, характерными для большинства пластичных смазочных материалов. Наиболее широко применяемыми в тяжелонагруженных узлах трения подвижного состава являются смазки ПУМА-МР и БУКСОЛ.

Повышение экономичности и надежности современной техники, а также ресурсных возможностей узлов трения достигается введением в смазочные композиции (СК) различных присадок. В качестве химически активных противоизносных и противозадирных присадок к ПС традиционно используют органические соединения. К ним относят жирные кислоты, полисульфиды, дитиофосфаты, эфиры фосфорной кислоты и другие присадки. Основным достоинством присадок органической природы является олеофильность –

растворимость в нефтяной масляной основе, и химическая активность, благодаря чему в режимах граничного трения происходит образование пленок химической адсорбции. Причем в жестких условиях эксплуатации железнодорожного транспорта присадки органической природы обладают невысокой термостабильностью, что вызывает разнообразные негативные химические процессы в ПС, инициируемые свободными радикалами или органическими ионами. Продукты разложения присадок запускают деструктивные процессы в дисперсионной среде и дисперсной фазе ПС, что ухудшает их адгезионные противоизносные характеристики [129].

Чтобы избежать указанных негативных процессов, необходимо в качестве присадок использовать неорганические вещества, устраняющие органические ионы и радикалы, способствующие деструктивным процессам в СМ.

Присадки неорганической природы могут представлять собой мелкодисперсные и ультрадисперсные металлы: молибден, медь, олово, свинец и их соединения в виде оксидов и сульфидов, дихалькогениды металлов, в том числе тугоплавких, и т. д. Из других веществ в качестве таких присадок широко применяются соединения класса серпентиниты, а из неметаллических веществ – графит, политетрафторэтилен, сурьма. Существуют комбинации составов, включающие в себя различный набор компонентов из вышеуказанных веществ, обладающих как определенными достоинствами, так и недостатками.

Достоинства: как правило присадки неорганической природы термически устойчивы (исключение может составлять политетрафторэтилен, в зависимости от условий работы трибоспоряжений). Многие соединения цветных металлов, особенно на основе меди, могут обладать высокими трибологическими характеристиками – как правило, способностями к эффектам реметаллизации, металлоплакирования, избирательного переноса, стабильной работе при высоких нагрузках, рабочих температурах и агрессивных средах [130].

Недостатки: следует отметить и недостатки добавок минеральной природы в пластичные смазки. Олеофобность – частицы нерастворимы в масляной основе,

и отсутствие способности к гелеобразованию характерны для большинства веществ минеральной природы, что, в свою очередь, требует для обеспечения трибологического эффекта постоянно поддерживать их во взвешенном состоянии.

Возможна недостаточная адгезия с поверхностью трибосопряжений, так как вещества не всегда являются химически активными – происходит адсорбция в основном за счет физических явлений. Образование пленки на шероховатых поверхностях пар трения, состоящей из цветных металлов и веществ слоистой структуры (графит, серпентиниты, дисульфиды молибдена), может приводить к таким негативным явлениям, как электроэрозионные и коррозионные процессы между слоем пленки и основой поверхности трибоконтакта.

Качество таких присадок, как дисульфид молибдена и серпентиниты, в значительной степени зависит от географии месторождений, а у последних также варьируется и количество примесей, что тоже необходимо учитывать [38]. Например, значительное влияние состава окружающей среды (особенно влажности) на фрикционные характеристики дисульфида молибдена ограничивает его применение в качестве твердой смазки узлов сухого трения, к которым предъявляются повышенные требования по стабильности рабочих характеристик при их эксплуатации в различных условиях; также наибольшему влиянию влажности подвержены ультратонкие порошки. В то же время для создания сплошной пленки твердой смазки на поверхности трения необходимо применять дисульфид молибдена крупностью (дисперсностью) менее 10 мкм [131].

Полученные в результате ряда исследований выводы свидетельствуют о том, что цветные металлы способствуют окислению масел, в том числе и нефтяных. Особенно сильным катализатором окислительных процессов масляной основы является медь и сплавы на ее основе. Например, известно, что трансформаторное масло, один из представителей нефтяных масляных фракций, деструктирует при контакте с цветными металлами, особенно с медью [132].

В исследованиях большое внимание уделено антифрикционным пластичным смазкам в узлах трения железнодорожного транспорта. В этом случае

ПС используют для уменьшения трения и износа трущихся деталей – в качестве антифрикционных смазочных материалов. Введение присадок в смазочные материалы способствует снижению шероховатости во время работы за счет адсорбции присадок во впадины (микрорельеф) шероховатости, поэтому они должны обладать хорошей адсорбцией к металлу.

Улучшать триботехнические свойства уже применяемых СМ введением новых эффективных присадок – наиболее оптимальный и экономичный путь повышения работоспособности и долговечности узлов трения железнодорожной техники.

Значительное внимание уделено исследователями пластичным смазкам с добавками металлов и фосфатных соединений.

Металлические порошки и мелкодисперсные пудры используются в уплотнительных смазках уже более 100 лет. Их вводят и в антифрикционные смазки для улучшения противозадирных и противоизносных свойств.

Смазки с металлическими добавками применяются в нагруженных подшипниках скольжения, шарнирах, зубчатых передачах, резьбовых соединениях и т. д.

Многие металлические порошки плакируют трущиеся поверхности. Толщина полученного слоя металла достигает 2–7 мкм. Концентрация металлических порошков по объему составляет не более 10–15 % объема смазки. Дисперсность обычно 2–7 мкм. В качестве добавок рекомендованы порошки Al, Cu, Fe и т. д.

Проблемы с использованием в СМ добавок в виде металлических порошков связаны с реакционной способностью и токсичностью металлов, имеются и технологические трудности. Одним из способов улучшения полезных свойств пластичных смазочных материалов (ПСМ) является введение в их состав соединений меди. Практически любые медьсодержащие добавки улучшают антифрикционные свойства основы за счет образования на поверхности трения тонкой медной пленки, способствующей увеличению площади фактического

контакта, а следовательно, снижению удельного давления и повышению износостойкости [133, 39, 41]. Также рядом исследований установлено, что введение различных соединений меди и ее порошка в смазочные материалы или контактирующие образцы приводит к повышению надежности и долговечности трущихся поверхностей деталей машин. Это объясняется реализацией в зоне фрикционного контакта явления избирательного переноса [134]. А после открытия избирательного переноса появилась теоретическая основа для использования порошков металлов и (или) их соединений с целью улучшения триботехнических свойств смазочных материалов, особенно пластичных смазок [130].

Однако, как было указано выше, следует отметить, что на окисление масел каталитически действуют некоторые металлы и сплавы, в том числе цветные металлы: свинец и медьсодержащие сплавы, например латунь.

Но, несмотря на это, использование в различных смазках металлоплакирующих присадок на основе ультрадисперсных порошков (УДП) меди, никеля, железа, олова и других металлов демонстрирует положительный эффект и находит широкое применение в создании различных присадок на уровне промышленных производств [135]. Существуют отечественные и зарубежные производители металлоплакирующих препаратов [38–43]. И научные исследования в этом направлении продолжаются.

Фосфатные компоненты в смазочных материалах представляют определенный интерес для применения их в смазке трибосопряжений. Так, например, эмпирически установлено, что при нанесении на рельс распылением некоторых фосфатных растворов исчезают шумы, причиной которых являлось скачкообразное скольжение, и поэтому на основе лабораторных исследований скачкообразного движения рекомендован фосфатный раствор [136].

Известен опыт применения присадок ДФ11 – диалкилдитиофосфата цинка – в смазочных маслах, обладающих высокими противоизносными характеристиками, за счет формирования защитных пленок, имеющих достаточно сложный состав: оксиды и сульфиды железа, и фосфат цинка. Такие поверхностные пленки снижают вероятность контакта сопряженных металлических поверхностей.

Однако, как показал опыт, эта присадка недолговечна, требуется ее регулярное дозированное восполнение. Для устранения этого недостатка предложено ввести медьсодержащую присадку МКФ18 [137]. Однако применение только присадки МКФ18 не позволяет достичь минимума коэффициента трения и износа, а при высоких нагрузках предотвратить схватывание. Далее авторы [137] предлагают совместное применение присадок ДФ11 и МКФ18 и получают улучшение трибологических характеристик.

Интерес к фосфатным соединениям в применении их в СМ продолжается на базе более глубокого научного подхода.

Так, были исследованы энергетические параметры фосфатов, проанализирована энергия разрушения молекулярных комплексов, которые, как полагают авторы, должны быть выше их конформационной перестройки [138].

Из вышесказанного следует, что успешный подбор противоизносных присадок к смазочным материалам в значительной степени зависит от изученности механизма их действия, а в отечественной и зарубежной литературе уделялось отдельное внимание изучению адсорбции смазочных масел и их ингредиентов на поверхности металла, так как адсорбция является важным энергетическим параметром, влияющим на эффективность противоизносного действия присадок. При этом характер адсорбции молекул присадок на границе раздела фаз определяет их последующую химическую активность и склонность к диссоциации поверхностно-активных молекул на поверхности металла. Диссоциация в известной степени снижает активационный барьер взаимодействия веществ. Очевидно, если некоторая часть молекул в поверхностном слое предварительно вступила в процесс диссоциации, то тогда адсорбированный слой может оказаться более подготовленным для развития химической реакции с металлом, в результате которой образуется модифицированный поверхностный слой. Изучение механизма действия противоизносных присадок требует дальнейшего методического усовершенствования, а также углубленного анализа получаемых результатов, а успешный подбор присадок и разработка смазочных материалов, обладающих высоким уровнем противоизносных свойств, возможны при условии, если все

составляющие процесса износа и смазки будут рассматриваться не изолированно друг от друга, а во взаимной связи между собой [139].

В работе [140] проведен глубокий анализ широкого опыта применения существующих смазочных материалов и присадок, из которого следует, что перспективными противоизносными и противозадирными присадками являются вещества неорганической природы с олеофильными свойствами – способностью растворяться в маслах, и у которых в молекуле отсутствуют органические радикалы. инициирующие деструктивные процессы в смазочных материалах. К такому типу присадок относятся гетерополифосфаты и конденсированные метафосфаты щелочных металлов, имеющие циклическую структуру молекулы, которая обладает способностью раскрываться в процессе трения с последующим проявлением свойств анионов встраиваться в структуру поверхности металла, чем и объясняется трибологическая эффективность указанных выше присадок.

Подводя итоги настоящего обзора, отметим, что снижение момента сопротивления, возникающего в узлах опирания кузова на тележки, и повышение износостойкости являются одними из главных задач по совершенствованию тяжелонагруженного трибосопряжения «пятник – подпятник» подвижного состава.

Представленный в обзоре материал позволяет наметить наиболее перспективные шаги к совершенствованию узла «пятник – подпятник» в виде увеличения износостойкости рабочих поверхностей узла и обеспечения низкого коэффициента трения при его работе. При этом вопрос повышения износостойкости должен решаться достаточно простыми техническими средствами, которыми могут быть оснащены линейные предприятия, а обеспечение антифрикционности узла также должно реализовываться простыми технологическими решениями.

1.4 Выводы и задачи исследования

В результате обзора и анализа литературных источников по вопросам повышения износостойкости тяжелонагруженных узлов трения подвижного состава применением электроискрового легирования и смазочных материалов представляется актуальным поиск новых разработок метода ЭИЛ в жидкой среде, исключающей электроэрозионный процесс, а также образование упрочненного модифицированного трибоконтакта и создание присадок к смазочным материалам, обеспечивающих создание вторичных структур – пленок фрикционного переноса с достаточно высокой адгезией к поверхности контактирующих трибосопряжений.

С этой целью в диссертации поставлены и решены задачи:

1 Разработать технологию ЭИЛ, обеспечивающую:

1) высокие физико-механические и трибологические характеристики поверхностей сопряжения трибосистем;
2) создание рациональной шероховатости, исключающей режим пленочного голодания пластичных смазок.

2 Исследовать морфологию, микроструктуру, физико-механические и трибологические характеристики модифицированных образцов электроискровым легированием в жидких средах.

3 Провести синтез новых присадок на основе метафосфатного состава, выяснить механизм их влияния на образование пленок фрикционного переноса.

4 На основе квантово-химических расчетов провести оценку совместимости с железом химических элементов, используемых в качестве электродов, способствующих упрочнению контактирующих поверхностей.

5 Показать соответствие теоретических исследований и практических результатов путем проведения лабораторных, стендовых и эксплуатационных испытаний повышения износостойкости тяжелонагруженных трибосистем с помощью комбинированного метода модифицирования поверхности трения, включающего применение электроискрового легирования и смазочных материалов с разработанными присадками.

Глава 2. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ В СОСТАВЕ ЖИДКИХ СРЕД НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФИЦИРОВАННОГО СЛОЯ

В настоящее время существует множество методов повышения износостойкости тяжелонагруженных трибосистем – как конструкционных (технология подачи смазки, обработка поверхности трибоконтакта для создания топографии поверхности трения, способы повышения теплоотвода), так и технологических (выбор материалов и технологии обработки поверхностей узлов трения и выбор смазочных материалов). При этом технологические методы имеют большой спектр способов поверхностной обработки: термическая, химическая, пластическое деформирование и разнообразное нанесение покрытий напылением, включая алмазоподобные, высокоэнтропийные и с памятью. Недостаток большинства перечисленных технологических методов заключается в том, что практически все они нуждаются в дорогостоящем оборудовании, сложны в исполнении и в конечном итоге требуют значительных экономических затрат.

Эффективная и надежная работа тяжелонагруженной трибосистемы, в том числе и трибосопряжения «пятник – подпятник», зависит от состояния рельефа поверхностей трения и адгезионных свойств смазочного материала, учитывая склонность пластичных смазок к пленочному голоданию.

Для обработки поверхности узла «пятник – подпятник» нами был выбран электроискровой метод легирования (ЭИЛ). Наличие окисной пленки на поверхностях трущихся деталей определило технологию ЭИЛ – проводить обработку в жидких средах и в качестве материала анода выбрать вольфрамовый электрод FUBAG серии WP с содержанием вольфрама не менее 99,5 %.

Физические явления ЭИЛ, основанные на электрической эрозии материалов при искровом разряде в газовой среде и полярном переносе продуктов эрозии на катод (обрабатываемую поверхность), разработанные основателями этого метода Н. И. Лазаренко, А. В. Рыбалко, показали эффективность получения упрочненных

поверхностей трения [141, 142]. В настоящей работе с целью повышения износостойкости трибосопряжений разработана технология метода электроискрового легирования в среде углеводородов и полиэтилсилоксановой жидкости, позволившая обеспечить улучшение физико-механических и трибологических характеристик материалов, используемых в узлах трения [74].

Следует отметить, что процессы, протекающие при электроискровом легировании, с трудом поддаются описанию при помощи математических моделей, поэтому теория формирования электроискровых покрытий в настоящее время весьма далека от завершения, и основная масса исследований в области ЭИЛ – это экспериментальные работы. К сегодняшнему дню накоплен значительный объем информации о процессах электрической эрозии металлов, составе и структуре формируемых в результате электроискровой обработки покрытий, исследованиях их механических и трибологических характеристик.

В результате модификации поверхности при электроискровой обработке состав поверхностного слоя металлов существенно изменяется в зависимости от материалов используемых электродов и межэлектродной среды.

В работах [76, 142] предпринята попытка вводить в межэлектродную зону вещества, обладающие низким потенциалом ионизации, которые способствуют повышению КПД ЭИЛ (доля полезных импульсов, тепловыделение). При ЭИЛ добавление в воду соединений, содержащих калий, натрий, бор, увеличивает выделение энергии у анода и, следовательно, его эрозию. Введение в межэлектродный промежуток веществ, интенсифицирующих массоперенос (графит марки Г-1, молотая слюда $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$, дисульфид молибдена ($MoS_2$), поташ ($K_2CO_3$), мыло, КВг, бура ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), которые осуществляют дополнительное легирование и стабилизируют электроискровой процесс, позволило повысить эффективность ЭИЛ и служебные характеристики деталей, расширить технологические возможности.

Действие поверхностно-активных веществ распространяется на характер формирования канала разряда во времени, а затем и на сам процесс выброса

металла в единичном акте эрозии [143, 144]. Проникая на межфазную границу, поверхностно-активные вещества изменяют условия возникновения микродуговых электрических разрядов и, следовательно, формирование поверхности [145]. К недостаткам данных способов можно отнести то, что введение веществ, интенсифицирующих массоперенос, усложняет технологический процесс и требует изготовления приспособлений, необходимых для подвода жидкостей и сыпучих материалов. В работе [146] автор систематизировал рабочие жидкости, применяемые в электроэрозионной обработке, и провел их сравнительный анализ на предмет обеспечения оптимальных режимов обработки материала для различных видов электроэрозионной обработки.

Очевидно, что на фазовый и химический состав осаждаемого слоя должно влиять внешнее окружение канала разряда (стримера), и в работах [75, 77] показано, что в жидких средах (масло, вода) происходит не только изменение фазового состава перенесенного на катод металла, но и значительный его привес по сравнению с ЭИЛ на воздухе. В частности, ЭИЛ в минеральном масле создает повышенную концентрацию атомов углерода в канале разряда за счет диссоциации углеводородов, что способствует дополнительному насыщению углеродом аустенита поверхностного слоя катода, т. е. межэлектродная среда позволяет менять поверхностные структуры трущихся сопряжений в нужном направлении.

В данной главе полученные теоретические результаты подтверждаются обстоятельными исследованиями по влиянию межэлектродной среды на физико-механические и трибологические характеристики ЭИЛ покрытий.

2.1 Методика проведения экспериментальных исследований поверхности, модифицированной методом ЭИЛ в жидких средах

Нанесение ЭИЛ осуществлялось на специально сконструированной нами установке (рисунок 2.1) [147], состоящей из пульта управления, генератора импульсов, а также размещенных на координатном столе электромагнитного

вибратора, электрода, держателя с образцами. Генератор импульсов позволял менять параметры импульсов: длительность (t, мкс), период (T, мкс), величину тока и напряжения. Образец из стали 30Х13 длиной 40 мм и шириной 20 мм при ЭИЛ вольфрамовым электродом (FUBAG серии WP, содержание вольфрама не менее 99,5 %) находился либо в индустриальном масле И-40, либо в полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-3.

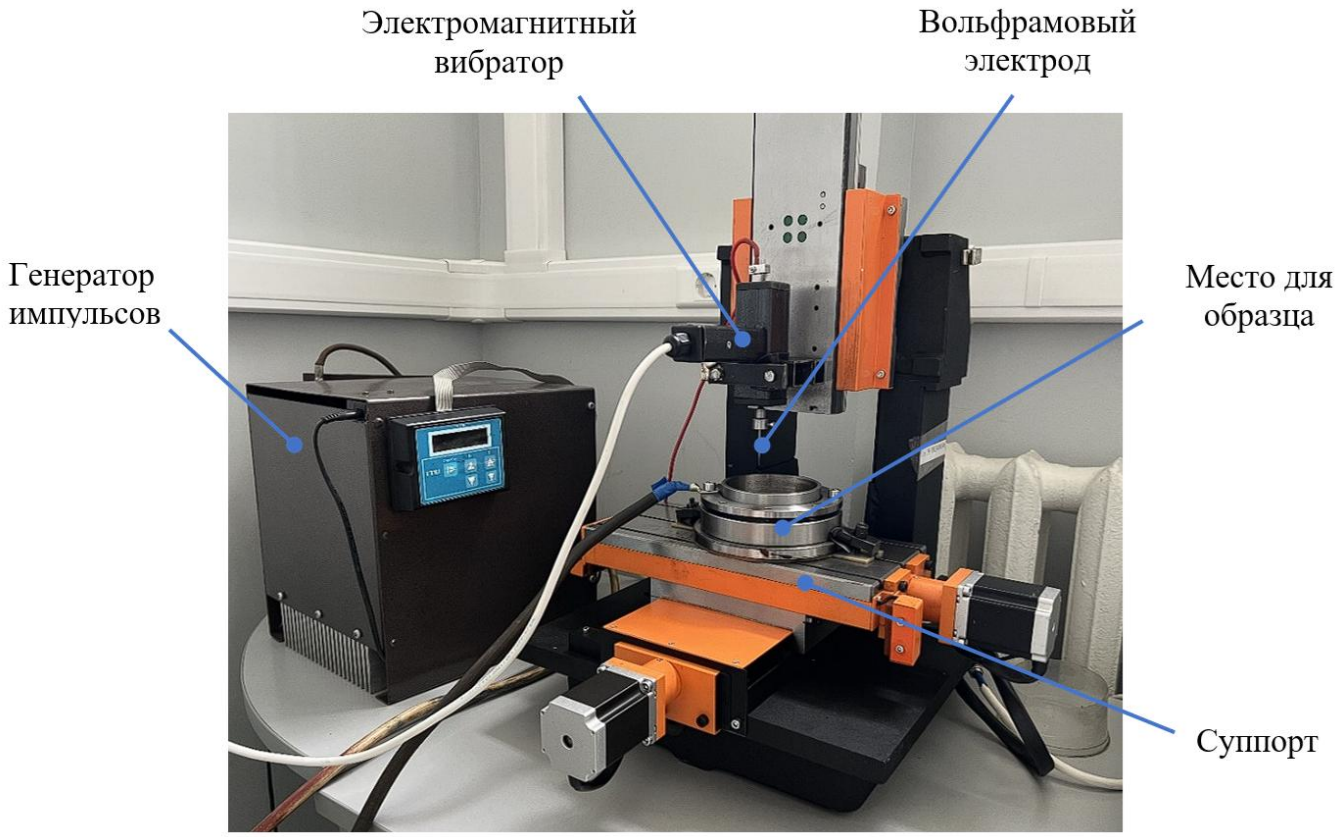


Рисунок 2.1 – Стенд для модификации поверхности методом электроискрового легирования в жидких средах

Для исследования в среде И-40 было выбрано девять образцов, модифицированных электроискровым легированием с разными периодами импульсов $T_{имп}$ и разной длительностью импульсов $t_{имп}$ (таблица 2.1), а также девять образцов для обработки в полиэтилсилоксановой среде (ПЭС-3) с теми же режимами $T_{имп}$ и $t_{имп}$.

Таблица 2.1 – Режим ЭИЛ образцов с разными значениями периода импульсов $T_{имп}$ и длительности импульсов $t_{имп}$ для сред И-40 и ПЭС-3

№ образцов	$t_{имп}$, мкс	$T_{имп}$, мкс
1	100	1000
2	100	4500
3	300	1000
4	300	1000
5	200	2750
6	100	2750
7	300	2750
8	200	1000
9	200	4500

Исследование испытаний на трение проводили на машине трения СМТ по схеме «ролик – вкладыш», последний, модифицированный электроискровым легированием в средах И-40 и ПЭС-3, имел плоскую поверхность, и при этом удельная интенсивность изнашивания определялась по глубине и ширине лунок износа, т. е. по объему износа:

$$I = \frac{di}{A \cdot dl},$$

где i – износ (объем); A – площадь трения; l – длина пути трения.

Для исследования был выбран ролик радиусом 20 мм из стали 45, который вращался с частотой 142 об/мин. Испытания осуществлялись в течение 8 часов при нагрузке на узел трения в 800 Н.

Износ определялся по глубине изношенного слоя h исходя из геометрических размеров лунки:

$$h = R - \frac{1}{2}\sqrt{4R^2 - l^2},$$

где R – радиус ролика; l – ширина лунки.

Геометрические параметры лунки определялись при помощи цифрового микроскопа Dino-Lite.

Исследования механических свойств проводились методом непрерывного индентирования на платформе NanoTest 600 фирмы Micromaterials Ltd (Япония). В качестве индентора при проведении испытаний использовалась трехгранная пирамида Берковича, изготовленная из алмаза (модуль упругости E = 1141 ГПа, а коэффициент Пуассона υ = 0,07).

Эксперимент проводился по следующей схеме: из каждого образца вырезался фрагмент поперечного сечения, который в последующем проходил процедуру шлифовки с целью исключения влияния шероховатости поверхности на данные измерений. Само измерение производилось в 15 точках, расположенных в одну линию от поверхности, подвергнутой модификации, вглубь с шагом между уколами 50 мкм. Максимальная нагрузка P_{max} была одинакова для каждого укола и составляла 10 мН. Общее время нагружения и разгрузки было постоянным и составляло по 20 с соответственно. Такая модель эксперимента позволила изучить градиент изменения механических характеристик образцов в зависимости от режимов обработки поверхности.

2.2 Исследование микроструктуры модифицированной поверхности образцов, прошедших электроискровое легирование в жидких средах

Анализ морфологии поверхности проводился при помощи оборудования NewView 600, которое оснащено объективом ×10 крат, и обзорная площадь при использовании данного объектива составляет 0,4 мм^2 [148].

С использованием программного обеспечения была получена средняя шероховатость – R_a [149, 150], представленная в таблице 2.2.

В работе также проведены структурные исследования. Микроструктурный анализ позволяет осуществлять исследования микроструктуры переходной зоны и основного материала. Изучение структуры границы и переходной зоны детали с покрытием позволяет судить об уровне прочности их соединения. Если четко

просматривается граница между покрытием и основным металлом, то связь осуществляется за счет механического взаимодействия. Если в образцах переходная зона сформирована из материала основы и покрытия в виде химических или металлических соединений, то такие покрытия обладают повышенными адгезионными свойствами.

Таблица 2.2 – Значения шероховатости и дисперсии параллельных опытов после ЭИЛ в жидких средах – индустриальном масле И-40 и полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-3

№ образца	Выходные параметры шероховатости					
	R_{a1}	R_{a2}	R_{a3}	$\overline{R}_a$	$s^2(R_a)$	$s(R_a)$
R_a (И-40), мкм						
1	9,410	5,148	6,427	6,995	4,783	2,187
2	**3,821**	**3,661**	**4,916**	**4,133**	**0,467**	**0,683**
3	5,021	5,323	8,489	6,278	3,690	1,921
4	4,802	6,573	8,989	6,788	3,705	1,946
5	4,346	4,870	4,854	4,690	0,089	0,298
6	4,791	6,562	9,075	6,809	4,634	2,153
7	5,737	9,227	6,801	7,255	3,200	1,789
8	**11,262**	**10,84**	**12,172**	**11,425**	**0,463**	**0,681**
9	9,820	6,135	7,073	7,676	3,668	1,915
R_a (ПЭС-3), мкм						
1	4,979	5,977	5,047	5,334	0,311	0,558
2	9,179	7,173	6,513	7,622	1,928	1,388
3	6,743	5,401	8,067	6,737	1,777	1,333
4	**9,007**	**9,102**	**8,450**	**8,853**	**0,124**	**0,352**
5	**5,856**	**4,659**	**5,029**	**5,181**	**0,376**	**0,613**
6	5,340	4,674	6,565	5,526	0,92	0,959
7	6,559	5,570	8,827	6,985	2,788	1,670
8	8,206	10,089	6,840	8,378	2,661	1,631
9	6,058	6,597	10,221	7,625	5,126	2,264

Для исследования влияния среды при ЭИЛ определяли элементарный состав и химическую связь в поверхностных слоях с помощью ЭСХА, рентгеновской и оже-электронной спектроскопии.

Учитывая, что главной задачей в работе поставлено исследование комбинированного метода модификации поверхности – создания микрорезервуаров для использования пластичных смазочных материалов с помощью ЭИЛ, то в первую очередь нами были проведены исследования по влиянию периода $T_{имп}$ и длительности импульсов $t_{имп}$ на значение шероховатости (см. таблицу 2.2). На основании полученных экспериментальных данных рассчитывали среднее значение шероховатости по параметрам измерений и дисперсии параллельных опытов.

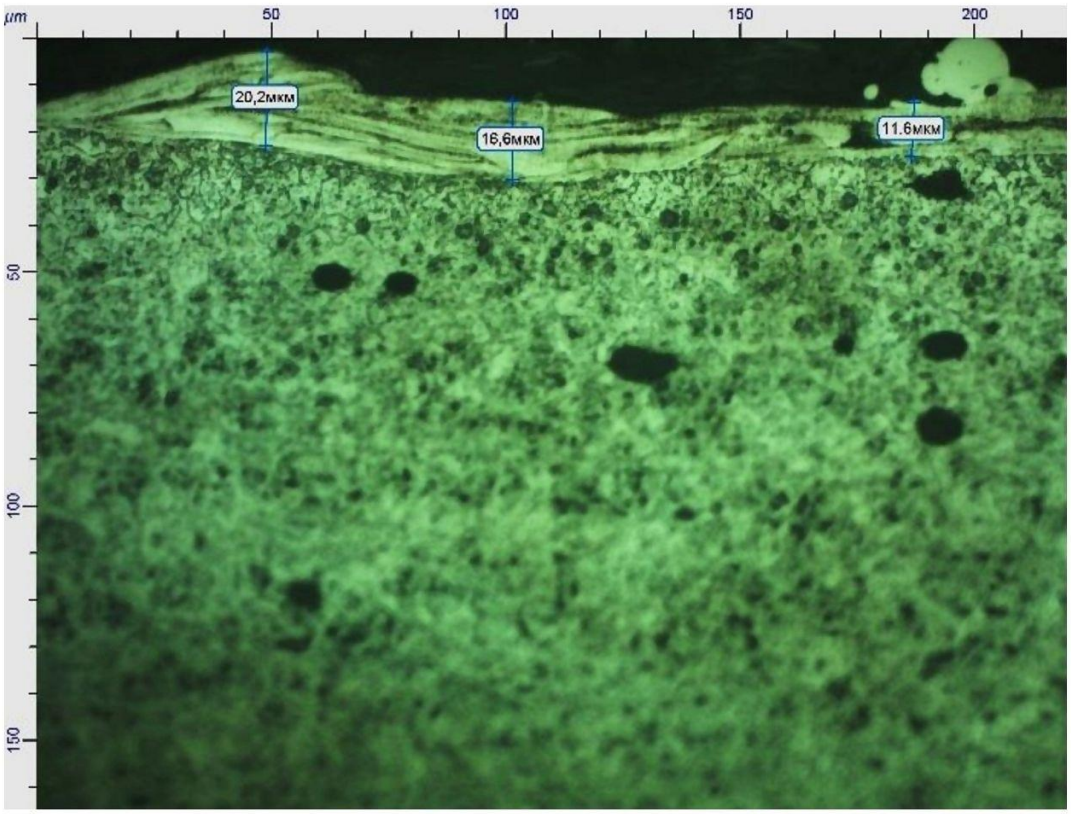
Из таблицы 2.2 видно, что шероховатость обработанных в среде И-40 образцов № 2 имеет минимальное значение, а образцы № 8 обладают максимальным значением шероховатости. В среде ПЭС-3 минимальное значение у образцов № 5, а максимальное значение шероховатости у образцов № 4.

Исследование шероховатости после обработки ЭИЛ было проведено на образцах, изготовленных из стали 30Х13 в виде четырехгранных прямоугольных брусков, где по одной из граней проведен процесс электроискрового упрочнения.

В результате металлографических исследований выявлено образование характерных для данного вида обработки областей так называемого белого слоя и диффузионного (переходная зона).

Белый слой при ЭИЛ в среде И-40 имеет полосчатую структуру толщиной в пределах 5–25 мкм (рисунок 2.2, *а*), а обработка в среде силоксановой жидкости приводит к образованию белой части и явной переходной зоны (рисунок 2.2, *б*). Данное наблюдение можно связать с разными теплофизическими свойствами жидкостей. Появление фаз и переходных структур при электроискровом легировании связано в первую очередь с температурой нагрева и скоростью охлаждения, которыми сопровождается процесс обработки.

а



б

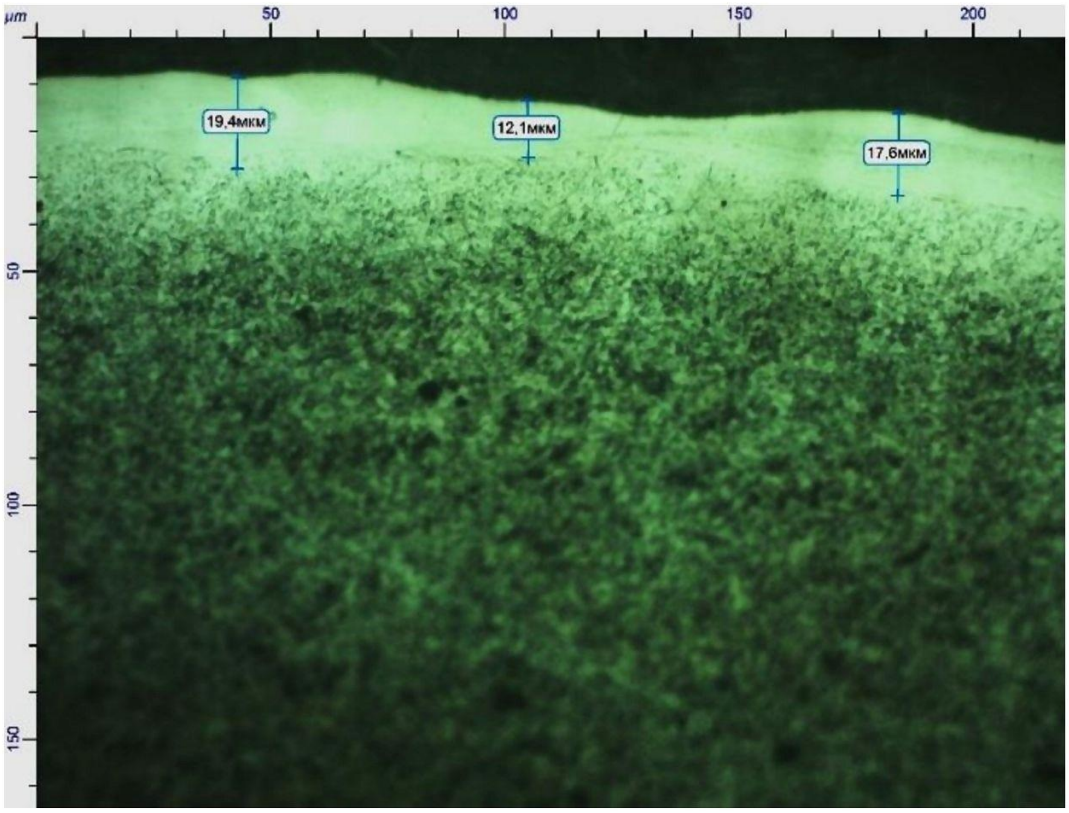


Рисунок 2.2 – Микроструктура поверхности, модифицированной путем ЭИЛ в среде И-40 (*а*) и в среде ПЭС (*б*)

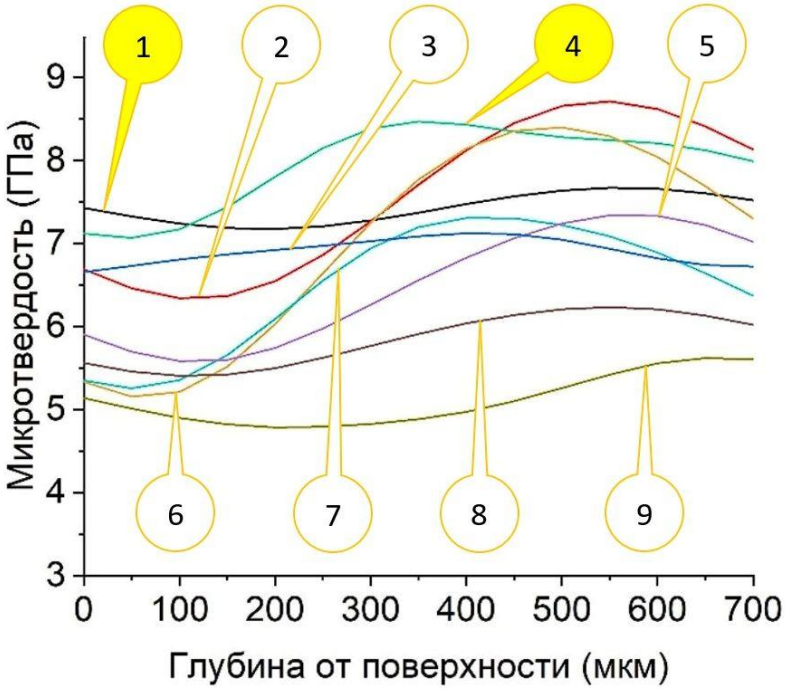
Нанесение модифицированного покрытия, основанное на переносе металла и легирующих элементов из электрода от «+» к «–» на поверхности детали с помощью направленных электрических разрядов, позволяет добиться изменения параметров и свойств металла, в том числе и увеличения износостойкости. Из-за высокой температуры в электроискровом промежутке между катодом и анодом металл и легирующие элементы приходят в ионообразное состояние и в виде плазмы переносятся от плюса к минусу на деталь. Электрические импульсы создаются в генераторе технологических импульсов тока с определенной частотой и подаются на электрод. Между электродом и поверхностью детали с заданной частотой и длительностью возникают электрические разряды, переносящие материал электрода на поверхность детали. В результате перемещения электрода относительно детали на поверхности образуется модифицированное покрытие с новыми свойствами. Толщина покрытия в зависимости от технологических параметров процесса нанесения может колебаться от 5 до 25 мкм и выше. Подбирая различный материал электрода и легирующих компонентов, можно получать поверхности с заданными механическими и трибологическими свойствами и характеристиками.

2.3 Исследование физико-механических характеристик образцов, подвергнутых электроискровому легированию в жидких средах

Для исследования твердости (H), модуля упругости (E) и расчета параметров сопротивления упругой (H/E) и пластической деформации (H^3/E^2) было выбрано 18 образцов из стали 30Х13 со значением твердости в пределах 5,7…6 ГПа. При этом девять образцов обрабатывались методами ЭИЛ в среде углеводородов и девять образцов – в среде полиэтилсилоксановой жидкости. Эти параметры характеризуют надежность детали при эксплуатации. На рисунке 2.3 приведены кривые, отражающие изменение микротвердости по нормам от поверхности, подвергнутой обработке. Как видно из графиков, максимальная величина микротвердости (H) достигается не у поверхности, а на некотором

углублении (от 300 до 600 мкм). Это может быть следствием высокой степени диффузии легирующих элементов с электрода в сталь. При этом практически у всех образцов наблюдается разупрочнение приповерхностного слоя, который находится в зоне термического влияния, от действия ЭИЛ.

а



б

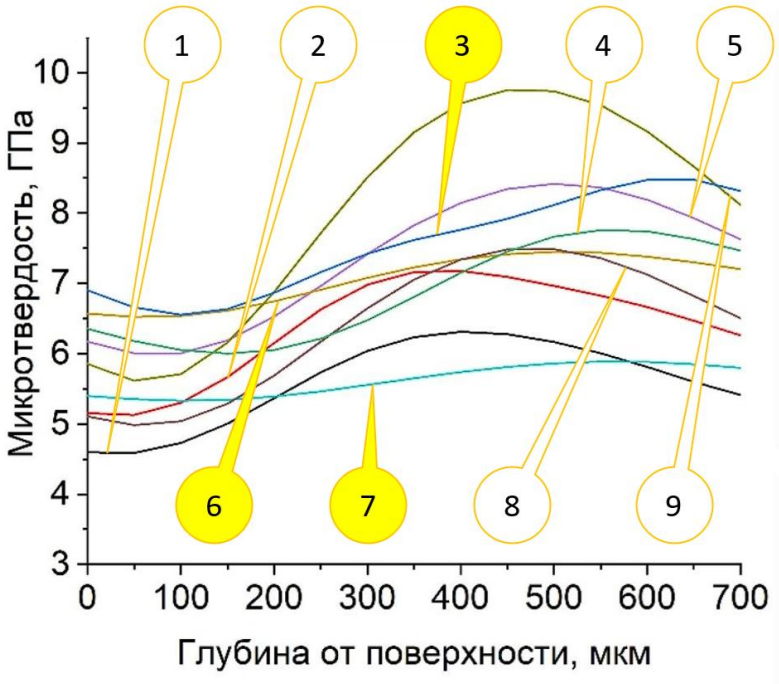


Рисунок 2.3 – Значения микротвердости образцов, модифицированных ЭИЛ в среде И-40 (*а*) и в среде ПЭС (*б*)

Анализ значений микротвердости и сопоставления их с результатами по режимам обработки поверхности электроискровым легированием в жидких средах (см. таблицу 2.2) позволяет сделать выводы по влиянию длительности импульса $t_{имп}$ и периода импульса $T_{имп}$, а также различных сред на величину микротвердости:

– при обработке поверхности в среде углеводородов максимальное значение микротвердости на обрабатываемой поверхности достигается в режимах длительности импульса $t_{имп} = 100$ мкс и $t_{имп} = 300$ мкс и при значениях периода импульса $T_{имп} = 1000$ мкс (кривые № 1, № 4 на рисунке 2.3, *а*);

– при обработке в полиэтилсилоксановой жидкости наибольшие значения микротвердости получены при различных значениях длительности импульса $t_{имп}$ и периода импульса $T_{имп}$: при длительности импульса $t_{имп} = 300$ мкс и периода импульса $T_{имп} = 1000$ мкс (кривая № 3 на рисунке 2.3, *б*); при $t_{имп} = 100$ мкс и $T_{имп} = 2750$ мкс (кривая № 6 на рисунке 2.3, *б*); в режиме $t_{имп} = 300$ мкс и $T_{имп} = 2750$ мкс твердость практически по всей глубине от поверхности не изменяется (кривая № 7 на рисунке 2.3, *б*).

Что же касается модуля упругости, у большинства образцов, прошедших модифицирование поверхности электроискровым легированием в среде углеводородов и полиэтилсилоксановой жидкости, он существенно не изменяется, оставаясь на уровне 200…230 ГПа. Однако резкое увеличение значения модуля упругости вплоть до 380 ГПа отмечается у образцов 5, 6, 9, прошедших обработку в среде углеводородов, и 1, 5, 7, 8 – в полиэтилсилоксановой жидкости. Это вызвано остаточными поверхностными напряжениями в металле.

В таблице 2.3 представлены значения H/E и H^3/E^2 для образцов 1, 2, 3, 4, обработанных в среде углеводородов, и для образцов 3, 4, 5, 6, 9 – в полиэтилсилоксановой среде.

Помимо твердости и модуля упругости нами дополнительно были рассчитаны величины H/E и H^3/E^2 на поверхности и на расстоянии 50 и 100 мкм от поверхности. Наибольшие значения были зафиксированы у образца № 1,

обработанного в среде И-40, при длительности импульса $t_{имп}$ = 100 мкс и периоде $T_{имп}$ = 1000 мкс, а для образца № 5, модифицированного в полиэтилсилоксановой среде, – при длительности импульса $t_{имп}$ = 200 мкс и периоде $T_{имп}$ = 2750 мкс.

Таблица 2.3 – Значения H/E и H^3/E^2 в первых трех точках от поверхности.

Упругость, пластичность	Глубина от поверхности, мкм	Образцы, модифицированные в среде углеводородов И-40				Образцы, модифицированные в полиэтилсилоксановой среде				
		1	2	3	4	3	4	5	6	9
H/E	0	0,045	0,028	0,03	0,03	0,036	0,031	0,039	0,027	0,030
	50	0,043	0,03	0,033	0,033	0,026	0,029	0,038	0,034	0,029
	100	0,037	0,034	0,033	0,037	0,029	0,027	0,034	0,028	0,029
H^3/E^2	0	0,017	0,0049	0,005	0,0059	0,009	0,0064	0,0122	0,0044	0,0059
	50	0,0141	0,0056	0,0078	0,0072	0,0042	0,0049	0,0113	0,0077	0,0051
	100	0,0099	0,0081	0,0073	0,0104	0,0051	0,0045	0,0082	0,0046	0,0051

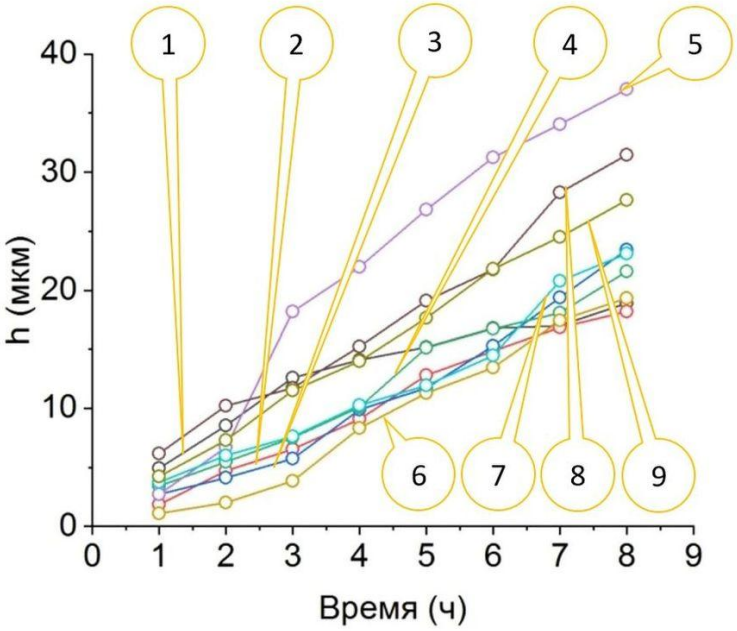
В результате полученных данных по параметрам H/E и H^3/E^2 в следующем разделе, посвященном трибологическим исследованиям, убедимся, что образец №1, модифицированный ЭИЛ в углеводородной среде И-40 и образец №5 – в полиэтилсилоксановой среде обладают повышенной износостойкостью.

2.4 Исследование триботехнических характеристик образцов, модифицированных электроискровым легированием в жидких средах

Трибологические испытания на износостойкость проводили по схеме «трение плоской колодки (пластины) из стали 30Х13 при различных режимах обработки – длительности импульса $t_{имп}$ и периода импульса $T_{имп}$ о вращающуюся поверхность катания ролика, изготовленного из стали 45». Параметром износостойкости, как мы и отмечали в методическом разделе (см. п. 2.1), является глубина лунки износа – h.

На рисунке 2.4 представлены зависимости износа во времени колодок из стали 30Х13, модифицированных электроискровым легированием при различных режимах обработки: длительности импульса $t_{имп}$ и периода импульса $T_{имп}$ в жидких средах – углеводородов И-40 (*а*) и полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-3 (*б*).

а



б

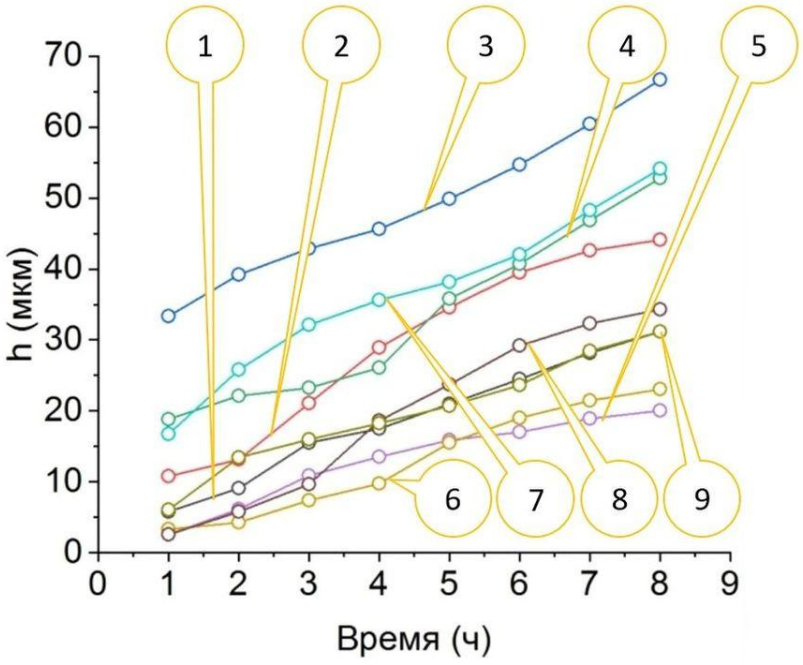


Рисунок 2.4 – Изменение величины износа во времени колодки, модифицированной ЭИЛ в различных средах:
а – в среде И-40; *б* – в среде ПЭС-3

Проведенные исследования убедительно показывают, что износостойкость образцов, модифицированных в углеводородной среде, для всех режимов обработки (длительности импульсов $t_{имп}$ и периода импульса $T_{имп}$) выше, чем при обработке в полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-3.

Для получения более полной картины зависимости износа от режимов нанесения – $t_{имп}$ и $T_{имп}$, было проведено исследование с применением двухфакторного ортогонального плана (таблица 2.4).

Всего было проведено девять опытов, из которых четыре – значения для линейного полнофакторного плана, одно – для центра плана и четыре – для звездных точек ± 1. Каждый опыт повторяли трижды и находили среднее значение.

Таблица 2.4 – Матрица двухфакторного ортогонального плана

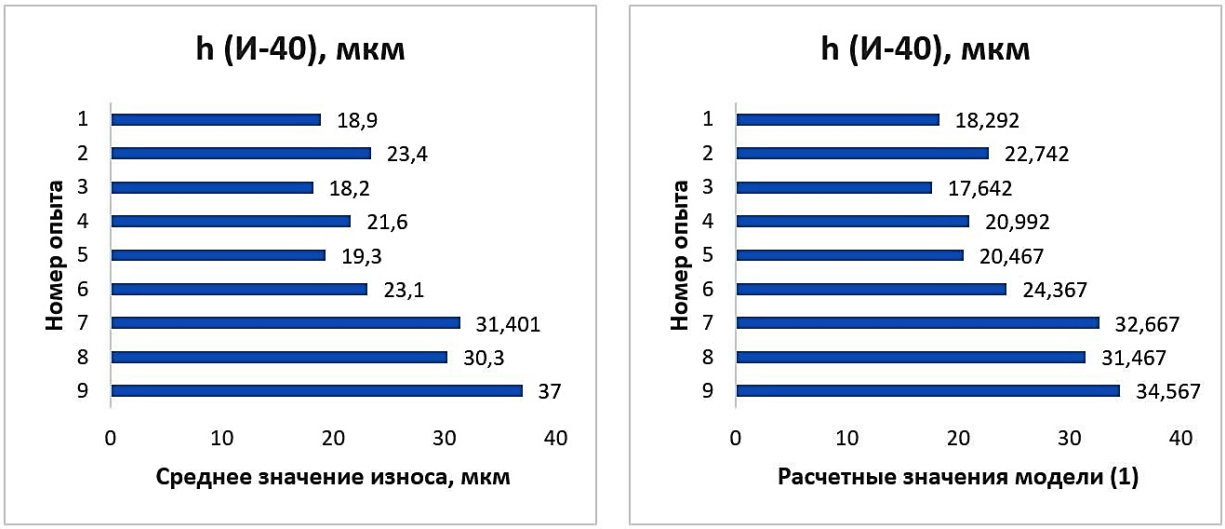
№ опыта	Матрица планирования		
	X_0	X_1	X_2
1	+1	-1	-1
2	+1	+1	-1
3	+1	-1	+1
4	+1	+1	+1
5	+1	-1	0
6	+1	+1	0
7	+1	0	-1
8	+1	0	+1
9	+1	0	0

После расчета и учета статистически значимых коэффициентов были получены уравнения регрессии износа h для случая модификации в среде И-40 (уравнение (2.1)) и в среде ПЭС-3 (уравнение (2.2)).

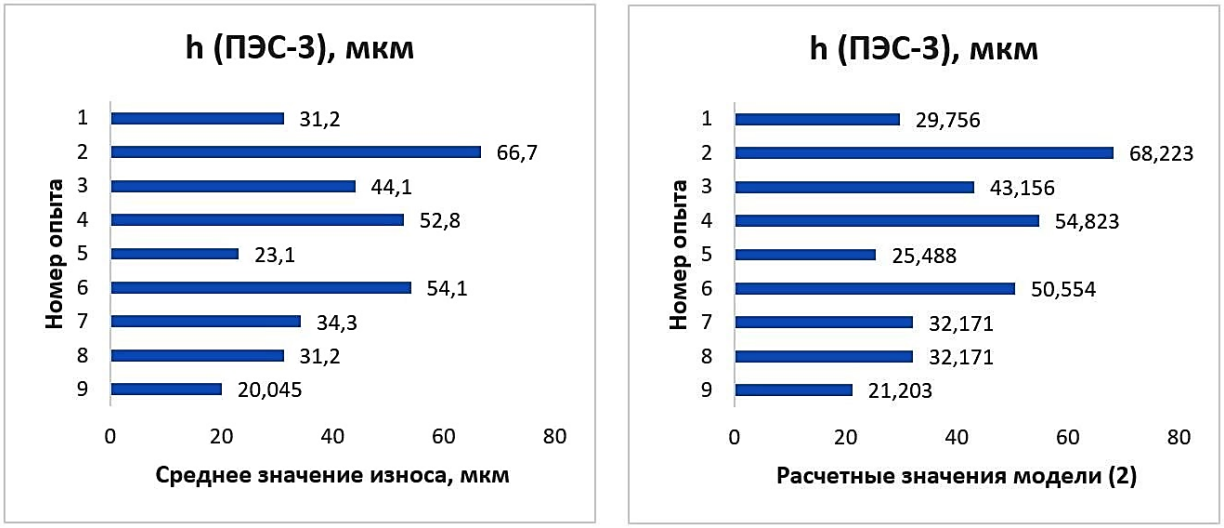
Прежде представим на рисунке 2.5 результаты средних значений эксперимента по износу $\overline{y_и}$ и расчеты износа по основании уравнений (2.1) и (2.2): И- 40 (рисунок 2.5, *а*) и в среде ПЭС-3 (рисунок 2.5, *б*):

– для И-40: $\hat{y}(h) = 34{,}57 + 1{,}95x_1 - 0{,}60x_2 - 0{,}27x_1x_2 - 12{,}5x_1^2 - 2{,}50x_2^2$, (2.1)

– для ПЭС-3: $\hat{y}(h) = 21{,}20 + 12{,}53x_1 - 6{,}70x_1x_2 + 16{,}82x_1^2 + 10{,}97x_2^2$. (2.2)



а



б

Рисунок 2.5 – Средние значения результатов эксперимента по износу и расчетные значения полученных моделей (2.1) и (2.2) для сред И-40 (*а*) и ПЭС-3 (*б*)

Кроме того, нами проведены расчеты дисперсии параллельных опытов. Так, для среды И-40: 1-й опыт – $S^2_{y_и} = 3{,}57$; 2-й опыт – $S^2_{y_и} = 12{,}3$; 3-й опыт – $S^2_{y_и} = 5{,}6$; 4-й опыт – $S^2_{y_и} = 9{,}14$; 5-й опыт – $S^2_{y_и} = 2{,}38$; 6-й опыт – $S^2_{y_и} = 6{,}46$; 7-й опыт – $S^2_{y_и} = 3{,}54$; 8-й опыт – $S^2_{y_и} = 7{,}44$; 9-й опыт – $S^2_{y_и} = 6{,}71$.

Для среды ПЭС-3: 1-й опыт – $S^2_{y_и} = 21{,}9$; 2-й опыт – $S^2_{y_и} = 44{,}5$; 3-й опыт – $S^2_{y_и} = 9{,}53$; 4-й опыт – $S^2_{y_и} = 47{,}1$; 5-й опыт – $S^2_{y_и} = 6{,}46$; 6-й опыт – $S^2_{y_и} = 57{,}4$; 7-й опыт – $S^2_{y_и} = 7{,}53$; 8-й опыт – $S^2_{y_и} = 7{,}88$; 9-й опыт – $S^2_{y_и} = 1{,}45$.

Проверка на адекватность по критерию Фишера (F) уравнений (2.1) и (2.2) показала их адекватность при уровнях значимости 0,05. Так как средние значения на рисунке 2.5 получены в результате значений из трех опытов, то нами проведена проверка дисперсий параллельных опытов по критерию Кохрена, и они оказались однородными, ввиду того что их расчетные значения были меньше табличных. Расчет дисперсии воспроизводимости и среднеквадратичных ошибок эксперимента показал:

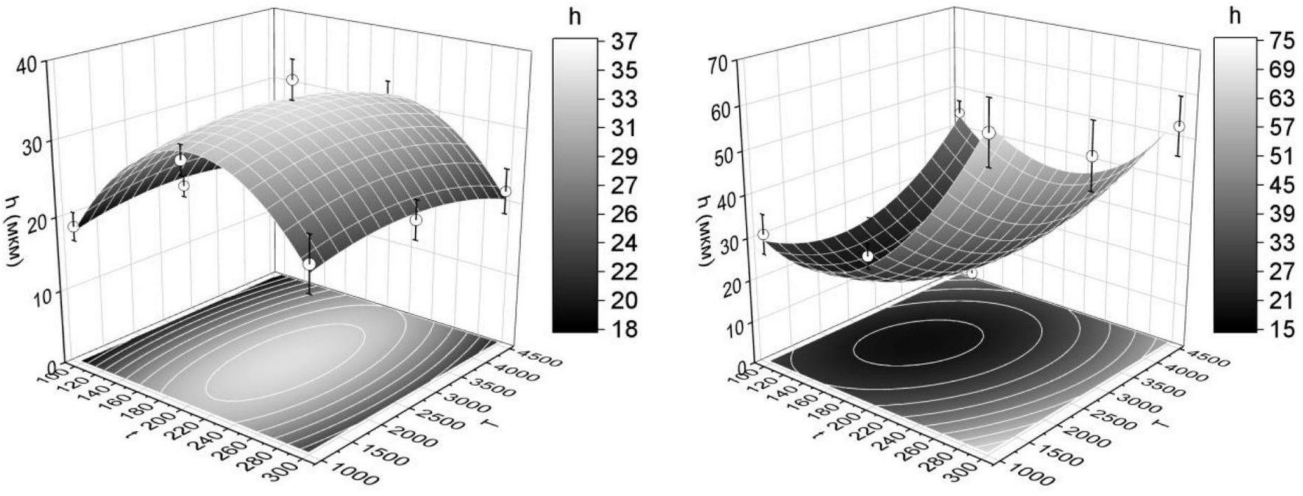
– для И-40: $S^2(h) = 6{,}35,\ \ S(h) = 2{,}52;$

– для ПЭС-3: $S^2(h) = 2{,}26,\ \ S(h) = 4{,}76.$

Полученные регрессионные модели уравнений (2.1) и (2.2) позволяют построить графики зависимости износа от режимов обработки $t_{имп}$ и $T_{имп}$, а также относительно скважности импульсов:

$$S_{имп} = T_{имп}/t_{имп}$$ для разных величин $t_{имп}$.

На рисунке 2.6 представлены изменения износа h от $t_{имп}$ и $T_{имп}$ для разных сред обработки ЭИЛ: *а* – в среде И-40; *б* – в среде ПЭС-3.



а *б*

Рисунок 2.6 – Зависимость износа h от $t_{имп}$ и $T_{имп}$:
а – в среде И-40; *б* – в среде ПЭС-3

На рисунке 2.7 представлены изменения износа h от скважности импульса $S_{имп}$ для различных значений длительности импульсов $t_{имп}$, мкс, от 100 до 300 мкс при шаге в 20 мкс и разных сред.

а

б

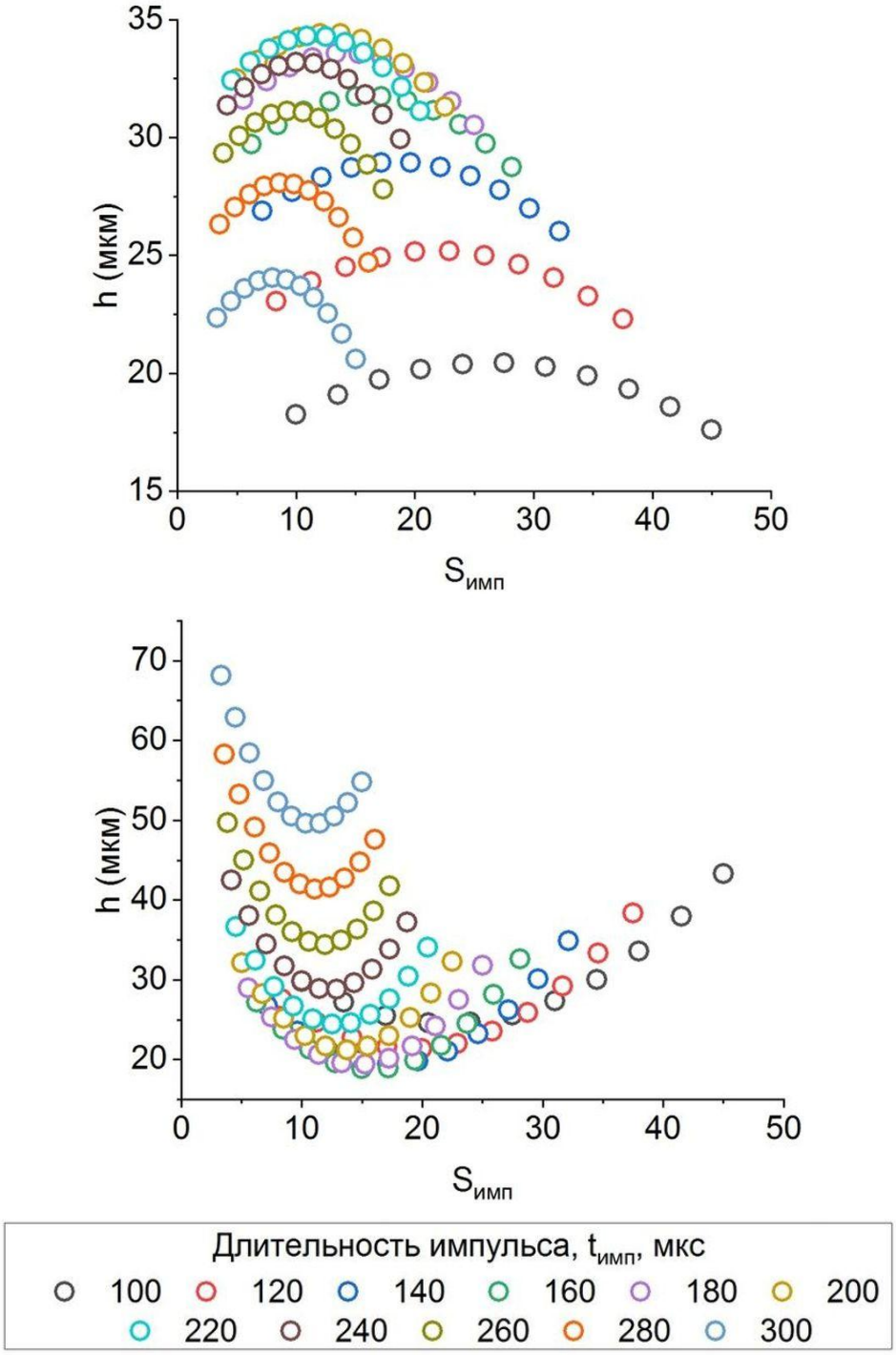


Рисунок 2.7 – Зависимость износа h от скважности импульса $S_{имп}$ для конкретных значений $t_{имп}$ и разных сред обработки электроискровым легированием:

а – в среде И-40; *б* – в среде ПЭС-3

Из анализа графиков рисунка 2.6 и уравнений (2.1) и (2.2) следует, что на величину износа h из двух параметров $t_{имп}$ и $T_{имп}$ большее влияние оказывает $t_{имп}$.

При этом характер зависимости износа от $t_{имп}$ и $T_{имп}$ для модифицирования в жидких средах – в среде углеводородов И-40 и полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-3 имеет различную зависимость. Так, минимальный износ h модифицированного покрытия в среде И-40 имеет $t_{имп} = 100$ мкс, а для ПЭС-3 минимальному износу подверглись образцы, обработанные в режиме $t_{имп} = 140…180$ мкс.

Что касается скважности, то при $t_{имп} = 100$ мкс для среды И-40 минимум износа наблюдается при скважности $S_{имп}$ от 10 до 45, а для ПЭС-3 минимальный износ испытали образцы, обработанные при скважности $S_{имп}$ от 10 до 20.

2.5 Выводы по главе 2

По разработанной методике электроискрового легирования проведен выбор оптимального рельефа на поверхности обрабатываемого образца и установлено:

1 Значение шероховатости обрабатываемой ЭИЛ поверхности зависит от периода импульса $T_{имп}$ и длительности импульса $t_{имп}$, а также от вида жидких сред обработки. Так, при обработке в среде И-40 наибольшее значение средней шероховатости зафиксировано у образца № 2 в режиме $T_{имп} = 4500$ мкс и $t_{имп} = 100$ мкс и составляет $\bar{R}_a = 11{,}425$ мкм, а наименьшее значение $\bar{R}_a = 4{,}133$ мкм – у образца № 8 при $T_{имп} = 1000$ мкс и $t_{имп} = 200$ мкс. При обработке в среде ПЭС-3 у образца № 4 при $T_{имп} = 1000$ мкс и $t_{имп} = 300$ мкс значение шероховатости составляет $\bar{R}_a = 8{,}853$ мкм, а у образца № 5 при $T_{имп} = 2750$ мкс и $t_{имп} = 200$ мкс $\bar{R}_a = 5{,}181$ мкм.

2 Исследования физико-механических характеристик образцов, подвергнутых электроискровому легированию в жидких средах, показали, что:

– при обработке поверхности в среде углеводородов максимальное значение величины микротвердости достигается при длительности

импульса $t_{имп} = 100$ мкс и $t_{имп} = 300$ мкс и при значениях периода импульса $T_{имп} = 1000$ мкс и $T_{имп} = 4500$ мкс;

– при обработке в полиэтилсилоксановой жидкости наибольшие значения микротвердости достигнуты при различных значениях длительности импульса $t_{имп}$ и периода импульса $T_{имп}$: при длительности импульса $t_{имп} = 100$ мкс и периоде импульса $T_{имп} = 2750$ мкс; при $t_{имп} = 200$ мкс и $T_{имп} = 2750$ мкс и 4500 мкс.

3 Трибологические испытания по схеме «ролик – пластина» показали, что износостойкость образцов, модифицированных в углеводородной среде, значительно выше, чем при обработке в полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-3. При этом минимальным износом обладают образцы, модифицированные в среде И-40 при длительности импульсов $t_{имп}$ = 100 и 300 мкс, и образец № 5, модифицированный в среде ПЭС-3 при длительности импульса $t_{имп} = 200$ мкс.

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ, ЭЛЕМЕНТНОГО И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР ОБРАЗЦОВ, ПРОШЕДШИХ МОДИФИКАЦИЮ МЕТОДОМ ЭИЛ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

Как мы уже отмечали, одной из основных проблем при обработке поверхности трения методом ЭИЛ в газовой среде является электрическая эрозия материалов при искровом разряде и перенос продуктов эрозии на обрабатываемую поверхность. Для устранения этого недостатка нами предложено проводить технологическую обработку методом ЭИЛ в жидкой среде с использованием вольфрамового электрода.

Для выяснения свойств и механизма работы предложенной технологии обработки поверхности трения методом ЭИЛ в жидкой фазе нами проведены исследования методами:

– рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС);

– инфракрасной спектроскопии;

– с помощью разработанной методики изучения влияния диффузионных процессов в зоне трения, позволяющей оценить энергию межатомного взаимодействия продуктов износа вольфрама с металлическим контртелом – железом, с применением квантово-химических расчетов.

3.1 Исследования химической связи поверхностных пленок в узле трения с помощью рентгеноэлектронной спектроскопии

Анализ химического состава вторичных структур, сформировавшихся при трении, был выполнен методом рентгеноэлектронной спектроскопии на приборе SPECS (Германия). Образцы для исследования представляли собой пластины размером 10×10×10 мм. Спектры были получены с образцов после трения и модификации поверхности ЭИЛ как в углеводородном связующем И-40, так и в среде полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-3. Нас прежде всего интересовал

вопрос, подвержены ли окислению поверхности, модифицированные электроискровым легированием в жидких средах. Для исследования были выбраны образцы с наилучшими трибологическими характеристиками, прошедшие электроискровое легирование в среде ПЭС-3 (образец № 5) и в углеводородной среде И-40 (образец № 2).

На рисунке 3.1 представлены РФЭС-спектры для кислорода Ols, полученные из образца № 5, модифицированного ЭИЛ в среде ПЭС-3. Спектр Ols от образца № 2, модифицированного ЭИЛ в среде И-40, имеет аналогичную картину по форме.

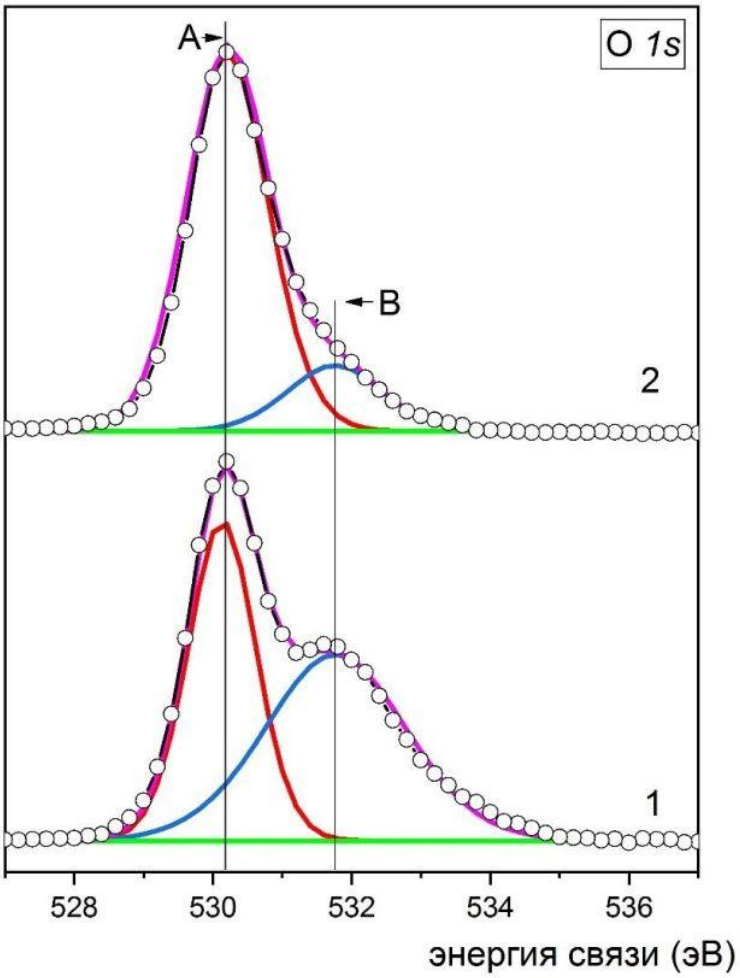


Рисунок 3.1 – Рентгеноэлектронный спектр кислорода Ols с поверхности образца № 5, прошедшей модификацию ЭИЛ в среде ПЭС-3:

1 – спектр, полученный с поверхности непосредственно после трения;

2 – после ионного травления

Анализ спектра Ols показывает, что компонента *A* находится в энергетическом диапазоне 529,9…530,2 эВ, что позволяет утверждать, что ее можно отнести к кислороду одного из оксидов железа Fe_3O_4 и Fe_2O_3 [151, 152], а компоненту *B* с энергией связи ~531,9 эВ – к адсорбированному кислороду [153].

Проведенные РФЭС исследования для остальных образцов, прошедших модификацию ЭИЛ в средах И-40 и ПЭС-3, показывают, что в процессе травления поверхности Ar^+ (спектр *2* на рисунке 3.1) характер энергетической картины спектров не изменяется. Однако заметно значительное снижение интенсивности пика *B*, относящегося к адсорбированному кислороду. При продолжении ионной бомбардировки пик *B* не исчезает, что позволяет заключить, что кислород либо растворен в стали, либо находится на ее межзеренных границах.

Далее проведем анализ спектров железа $Fe2p_{3/2}$, $Fe2p_{1/2}$ для образцов: № 5, прошедших обработку в среде ПЭС-3 (рисунок 3.2), и № 2 – в среде И-40 (рисунок 3.3).

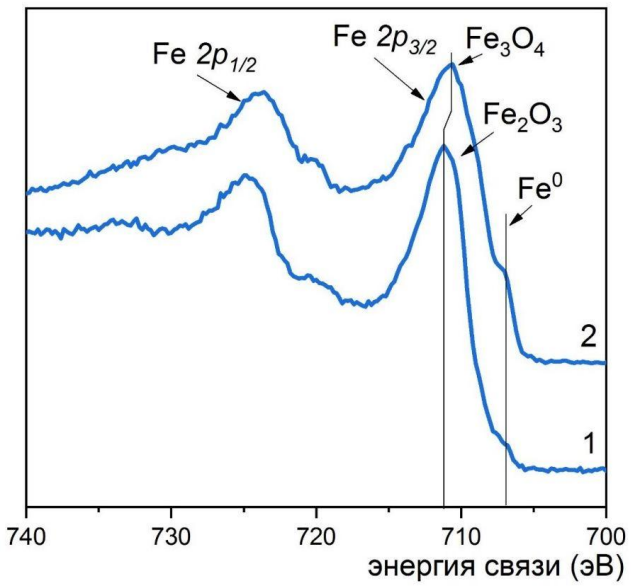


Рисунок 3.2 – Рентгеновский фотоэлектронный спектр железа – линия $Fe2p_{1/2}$, $Fe2p_{3/2}$, полученная с поверхности трения для образца № 5, прошедшего электроискровое легирование в среде ПЭС-3:

1 – с поверхности после трения; *2* – после ионного травления

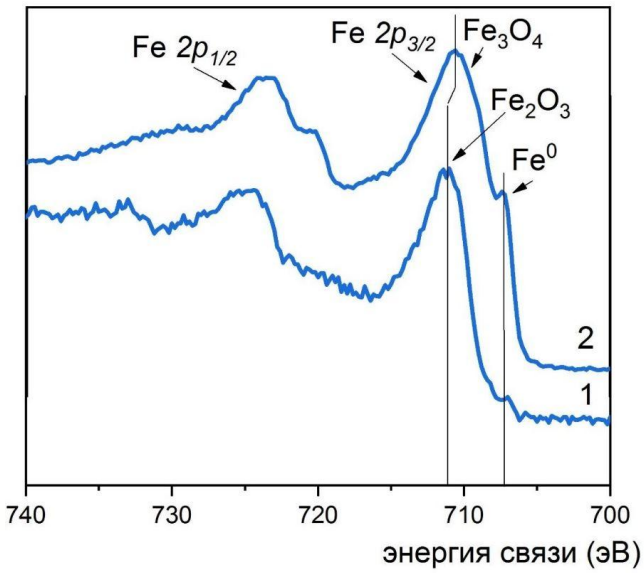


Рисунок 3.3 – Рентгеновский фотоэлектронный спектр железа – линия $Fe2p_{3/2}$, $Fe2p_{1/2}$, полученная с поверхности трения для образца № 2, прошедшего ЭИЛ в среде И-40:
1 – с поверхности трения; *2* – после ионного травления

Как видно из рисунков 3.2 и 3.3, рентгенофотоэлектронные спектры, полученные из поверхностей разных образцов № 5 и № 2 спектры Fe $2p_{3/2}$ и Fe $2p_{1/2}$. Для $Fe2p_{3/2}$-уровня к металлической компоненте мы относим энергетический диапазон 706,75…707,5 эВ, к оксиду Fe_3O_4 мы относим компоненту, расположенную в энергетическом диапазоне 710,3…710,7 эВ, а к оксидам со степенью окисления (+2) и (+3) – компоненты с энергией связи 709,5 эВ и 711,0…711,5 эВ. При этом дополнительным признаком присутствия магнетита Fe_3O_4 в исследуемом слое является наличие в профиле $Fe2p_{3/2}$, $Fe2p_{1/2}$-спектра характерной особенности с энергией, отстоящей от максимума спектра на расстоянии 1,8 эВ в сторону меньших энергий связи, и отсутствие сателлита переноса заряда сат. (+3) около 718,5 эВ. В области энергии связи около 707 эВ имеют плечо (со стороны меньшей энергии связи), что означает, что поверхность трения содержит участки с неокисленным железом Fe^o (металлическое железо для компоненты Fe $2p_{3/2}$-спектра) [154].

Таким образом, данные по химической связи, определенные РФЭ спектров Fe $2p_{1/2}$ и Fe $2p_{3/2}$, подтверждают данные по O1s-спектрам. Наличие неокисленного железа на поверхности стали связано с двумя факторами:

– использованием в качестве электрода при ЭИЛ вольфрама;

– проведением модифицирования поверхности путем электроискрового легирования в жидких средах.

Для выяснения влияния жидкой фазы на процесс окисления вольфрамового W электрода и модифицированного образца нами проведены исследования методом ИК-спектроскопии на приборе Nicolet 380 (США) в широком диапазоне волновых чисел и разных средах: И-40 и ПЭС-3. При этом ИК-спектры снимались после одного и двух проходов электродом по поверхности исследуемого образца электроискровым легированием. Полученные результаты представлены на рисунке 3.4 (для среды И-40) и рисунке 3.5 (для полиэтилсилоксановой жидкости).

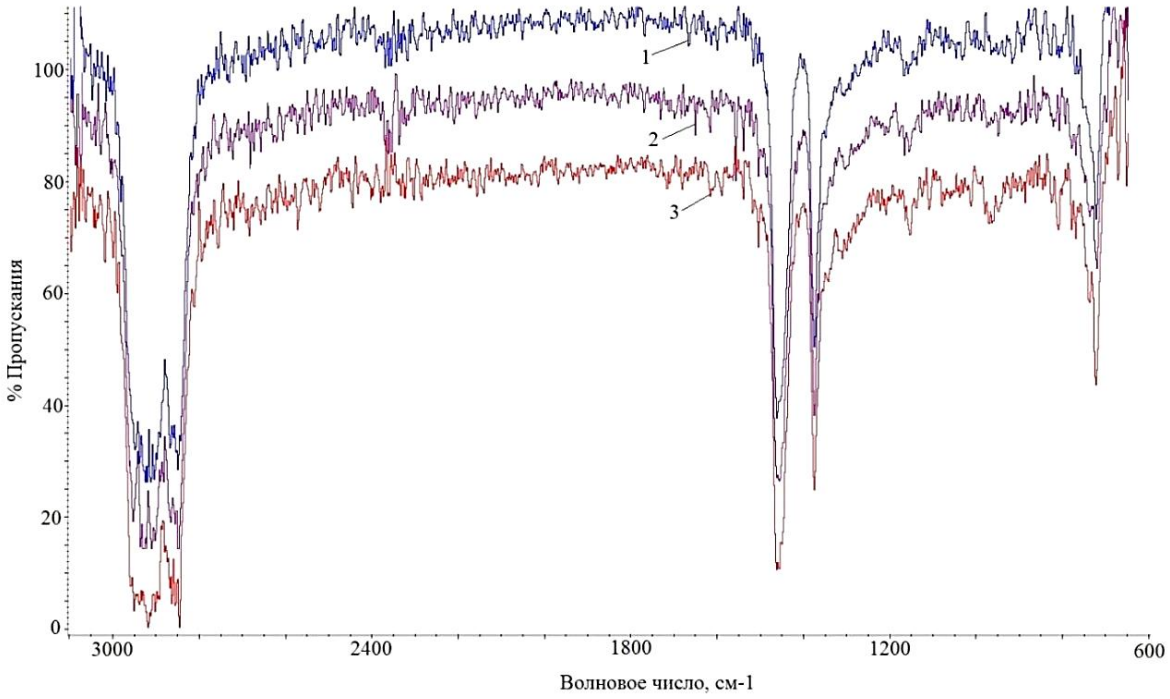


Рисунок 3.4 – Изменение ИК-спектров в диапазоне волновых чисел 3100…600 см$^{-1}$ в жидкой среде при ИЭЛ:

1 – исходная жидкость (индустриальное масло И-40); *2* – И-40 после однократного нанесения ЭИЛ; *3* – И-40 после двукратного нанесения ЭИЛ

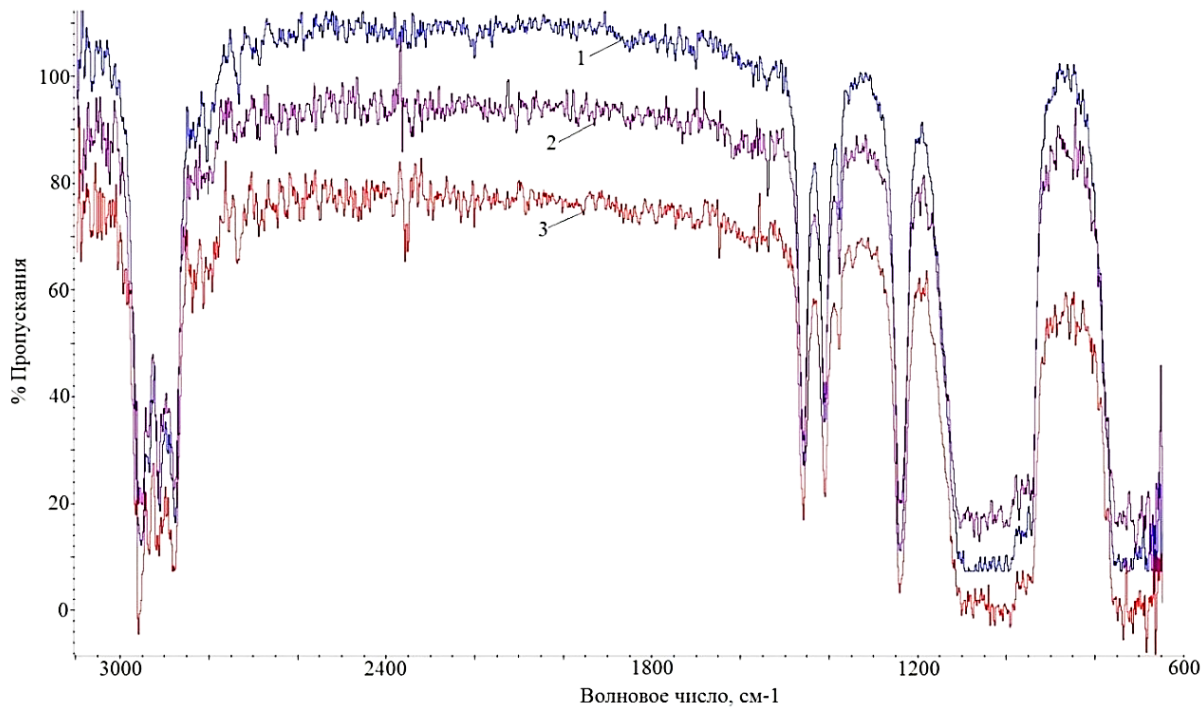


Рисунок 3.5 – Картина ИК-спектров:

1 – в исходной жидкости ПЭС-3; *2* – после однократного нанесения ЭИЛ;

3 – после двукратного нанесения ЭИЛ

Анализ ИК-спектров показывает, что жидкие среды И-40 и ПЭС-3 при электроискровом легировании не окисляются. На это указывает отсутствие полос поглощения кислородных фрагментов – валентных колебаний связей С–О в области 1330…1050 $см^{-1}$ и валентных колебаний С=О в области 1790…1650 $см^{-1}$.

Таким образом, результаты проведенных исследований с использованием рентгеновской фотоэлектронной и ИК-спектроскопии позволяют утверждать, что жидкие среды являются барьером для вольфрамового электрода и стальной поверхности образца от окисления при модификации поверхности электроискровым легированием [155].

3.2 Исследования морфологии и элементного состава поверхностей образцов, обработанных ЭИЛ в жидких средах

Структурно-фазовые исследования поверхностей, подвергаемых электроискровому легированию в жидких средах, проводились на растровом электронном микроскопе (прибор Zeiss EVO MA-18), оснащенном кремний-дрейфовым детектором Oxford X-Max 50 – анализатором химического состава, а также детекторами вторичных и обратно рассеянных электронов. В результате нами получено процентное содержание вольфрама и углерода в модифицированном слое поверхности с помощью ЭИЛ в разных средах: И-40 и ПЭС-3 (рисунки 3.6–3.9). В главе 2 нашими исследованиями установлено, что износостойкость образцов, обработанных в среде И-40, выше, чем у образцов, прошедших обработку в среде ПЭС-3. С целью объяснения этого проведем анализ результатов, представленных на рисунках 3.6 и 3.7, а также на рисунках 3.8 и 3.9.

На рисунках 3.6 и 3.7 приведены результаты, полученные на растровом электронном микроскопе, по содержанию вольфрама – W, ат. % и углерода – C, ат. % в образцах, модифицированных электроискровым легированием в среде И-40.

Рисунок 3.6 – Изменение содержания вольфрама в процессе ЭИЛ в среде И-40

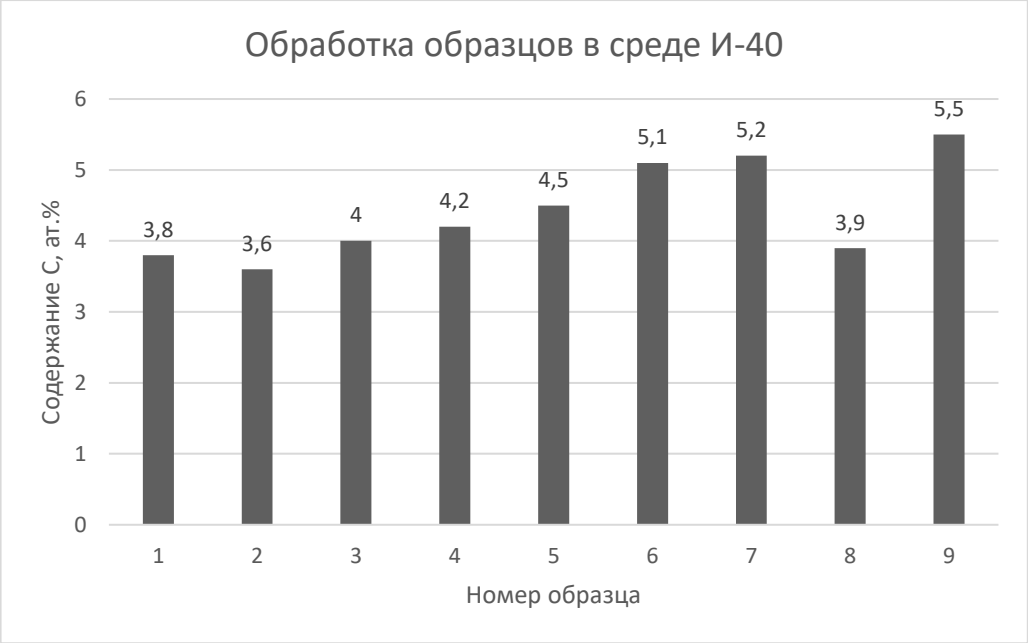


Рисунок 3.7 – Изменение содержания углерода в процессе ЭИЛ в среде И-40

Результаты, полученные на растровом электронном микроскопе, по содержанию вольфрама – W, ат. % и углерода – С, ат. % в образцах, модифицированных электроискровым легированием в среде ПЭС-3, отражены на рисунках 3.8 и 3.9.

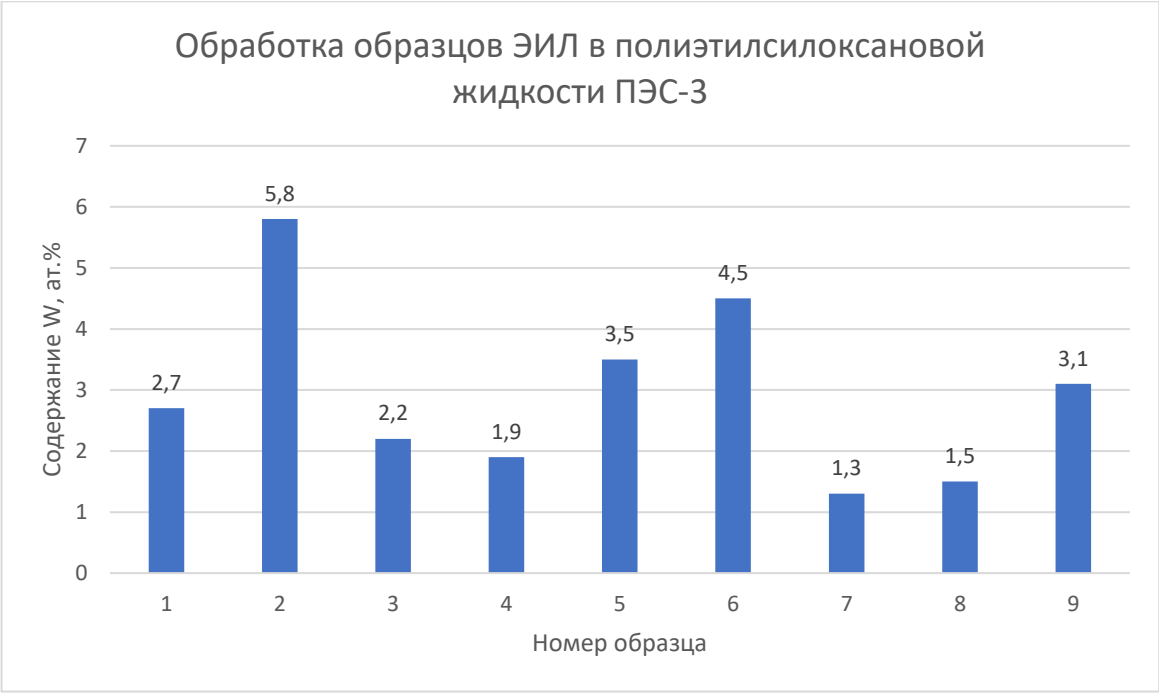


Рисунок 3.8 – Изменение содержания вольфрама в процессе ЭИЛ в среде ПЭС-3

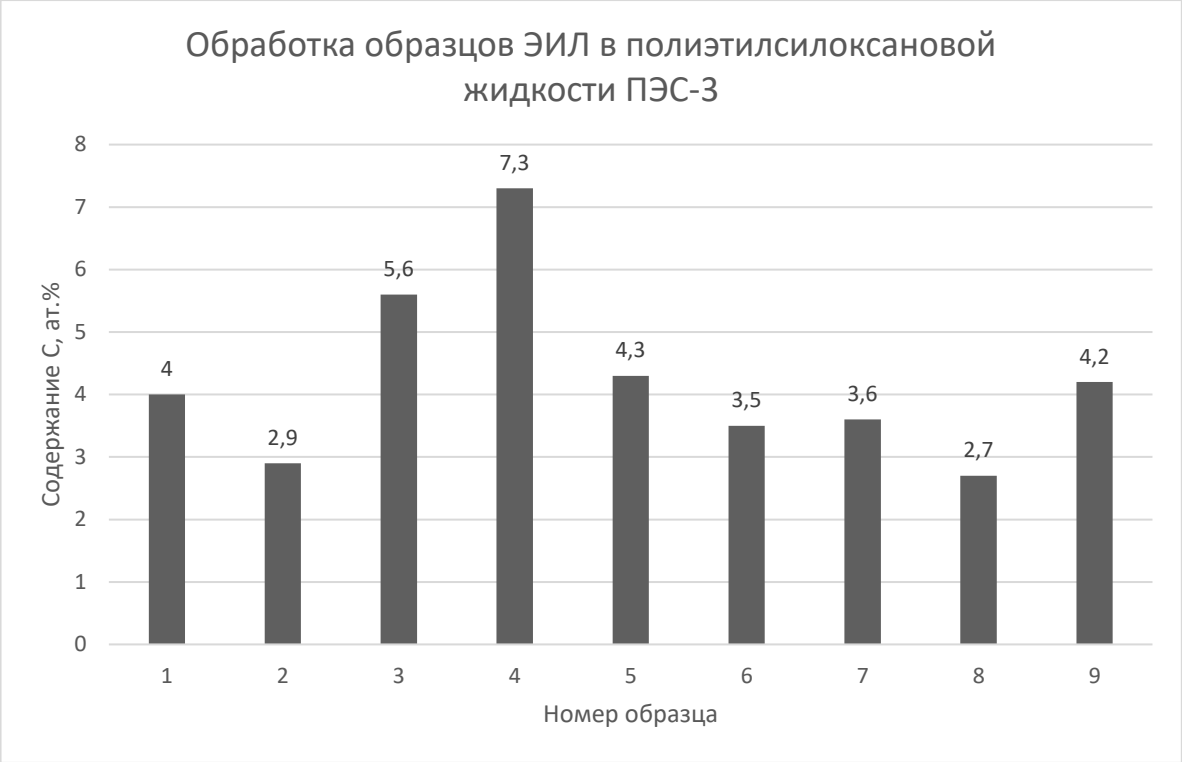
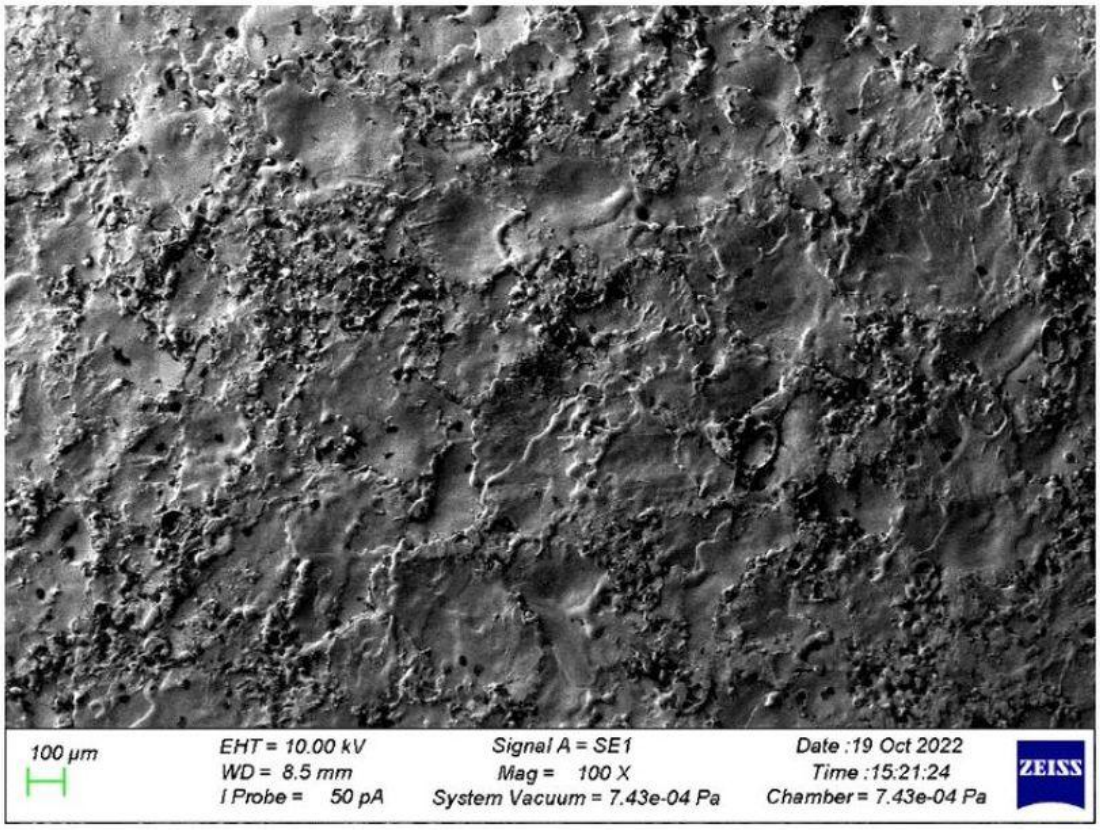


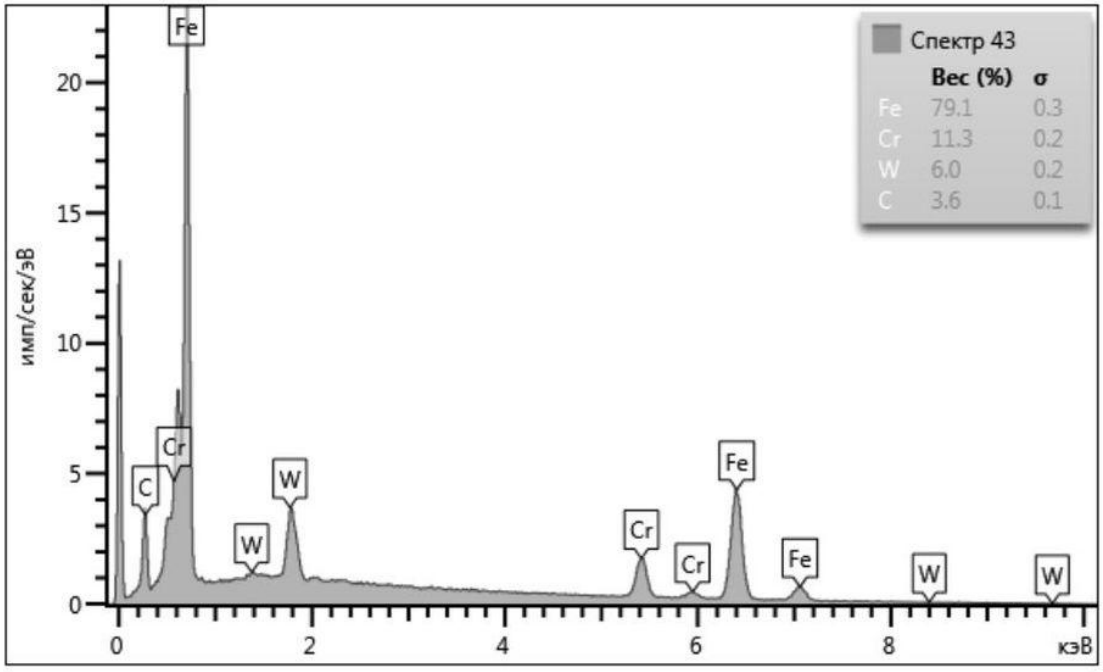
Рисунок 3.9 – Изменение содержания углерода в процессе ЭИЛ в среде ПЭС-3

На рисунках 3.10 и 3.11 представлены морфология поверхности и результаты, полученные на растровом электронном микроскопе.

Как видно из рисунков, морфология поверхности образцов на рисунках 3.10, *а* и 3.11, *а* существенно отличается. Очевидно, что плотность оплавленных зон на рисунке 3.10, *а* выше, чем на рисунке 3.11, *а*. Оплавленные зоны представляют собой высокодиспергированные выступы рельефа на поверхности образца. Возможно, что их дисперсность связана с присутствием внедренных карбидов вольфрама WC. Выступы рельефа как на рисунке. 3.10, *а*, так и на рисунке 3.11, *а* разделены впадинами с более гладким рельефом, что характерно для исходной стали с подплавленной поверхностью.

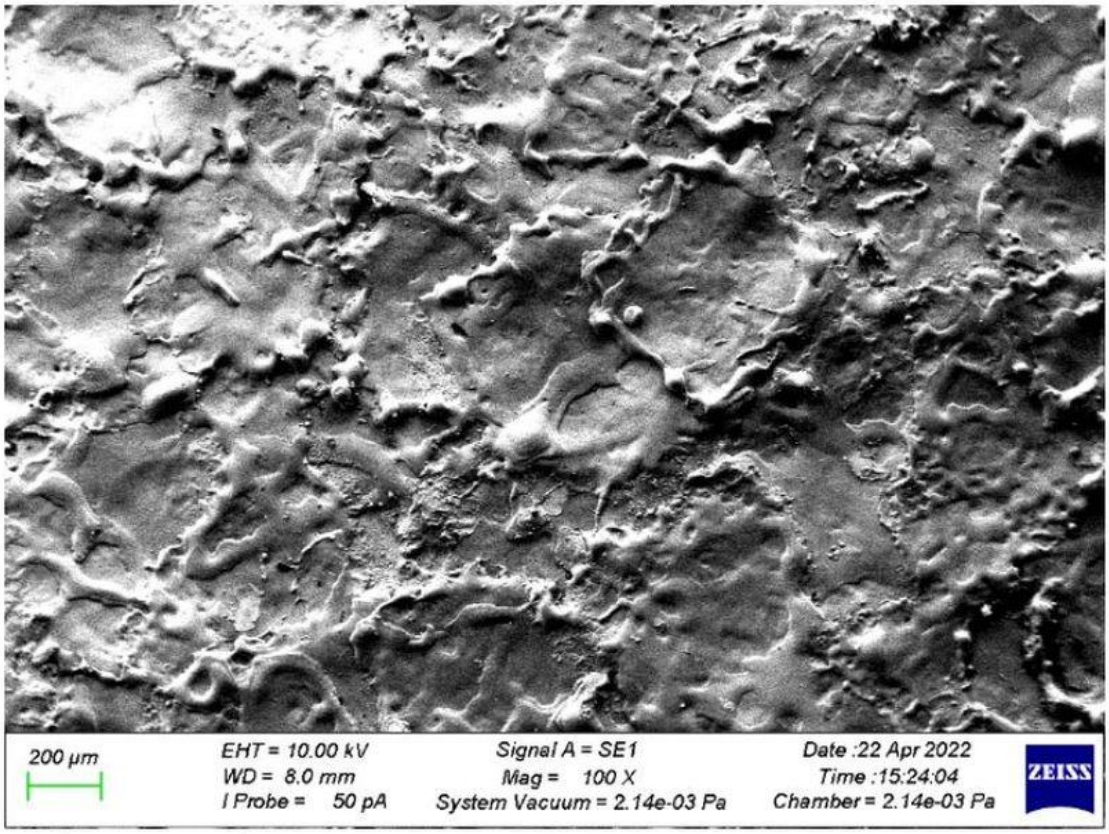


а

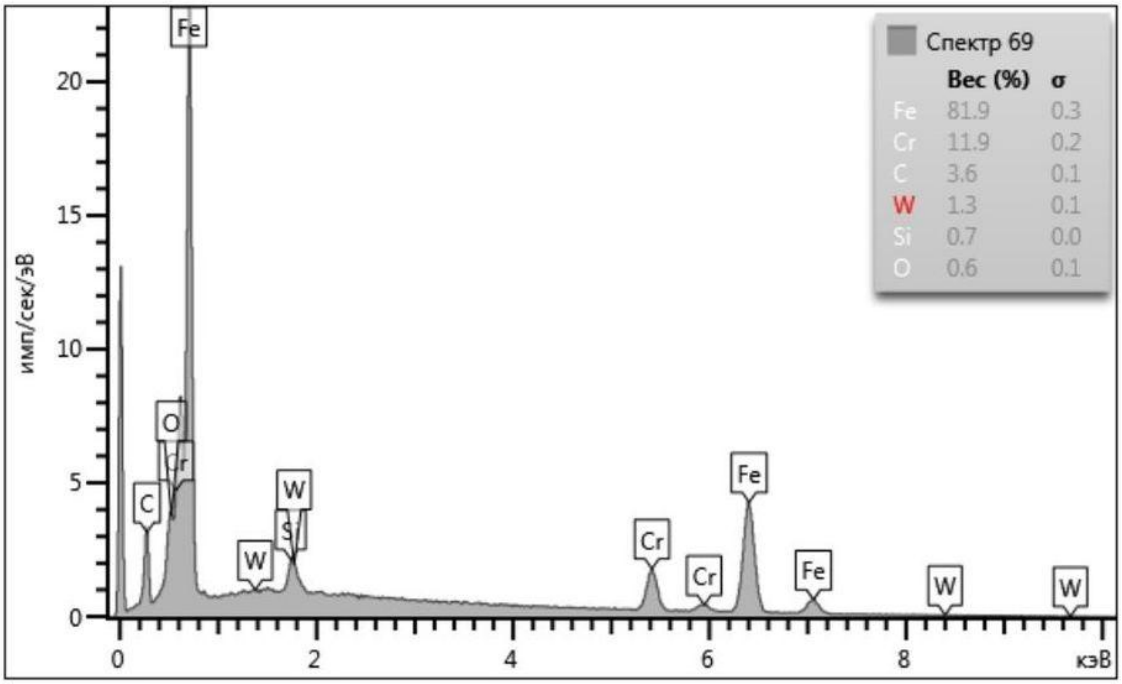


б

Рисунок 3.10 – Морфология (*а*) и распределение элементного состава (*б*) образца, модифицированного электроискровым легированием в среде И-40



а



б

Рисунок 3.11 – Морфология (*а*) и распределение элементного состава (*б*) образца, модифицированного электроискровым легированием в среде ПЭС-3

Описанные морфологические особенности соответствуют данным элементного состава, приведенным на рисунках 3.10, *б* и 3.11, *б*: более высокое содержание вольфрама на рисунке 3.10, *б* отвечает более высокой плотности оплавленных зон и большему количеству дисперсных частиц в этих зонах (предположительно карбидов вольфрама WC) на рисунке 3.10, *а*. Поскольку содержание вольфрама (6 вес.% W) на рисунке 3.10, *б* значительно превышает содержание углерода (3,6 вес.% C), то можно утверждать, что W присутствует в поверхностном слое стального образца не только в виде карбидов, но и в виде отдельных атомов, внедренных в кристаллическую решетку феррита (α – Fe). В этом случае с помощью технологии ЭИЛ в поверхностном слое стали реализуются два механизма упрочнения – дисперсионный (за счет наличия карбидов WC) и твердорастворный (за счет внедренных в решетку феррита атомов W).

Данное предположение будет рассмотрено в разделе 3.3 – после исследования рентгеновских фотоэлектронных спектров поверхности при трении образцов, подвергнутых модификации в средах И-40 и ПЭС-3, а также квантово-химического расчета энергии связи поверхностных структур этих образцов.

Результаты оценки процентного содержания вольфрама W, ат. %, у образцов с модифицированной поверхностью ЭИЛ в среде И-40 демонстрируют большее содержание вольфрама, чем в поверхностях, модифицированных в среде ПЭС-3.

Это объясняется тем, что массоперенос вольфрама в жидких средах определяется энергией импульса, на величину которого оказывают влияние распределение и поглощение энергии в процессе электроискрового легирования [88]. Сравнивая составы межэлектродной среды – углеводородной среды (индустриальное масло И-40) и полиэтилсилоксановой жидкости – ПЭС-3, их теплофизические характеристики, в этом нетрудно убедиться: для ПЭС-3 расходуется больше энергии на нагрев, термодеструкцию, ионизацию атомов химических элементов, расширение, ударную волну, чем для И-40. Кроме этого, И-40 обладает более низким потенциалом ионизации, что способствует повышению КПД электроискровых импульсов (доли полезных импульсов) [92, 144].

Проведем сравнение и анализ результатов по зависимости износа образцов, модифицированных ЭИЛ в различных средах, представленных в п. 2.4 настоящего диссертационного исследования (см. рисунок 2.4), с данными рисунков 3.6–3.9 по содержанию вольфрама – W, ат. %. Сравнение проведем в следующей последовательности: сначала выберем образцы из партии, обработанной ЭИЛ в средах И-40 и ПЭС- 3 с одинаковым содержанием углерода, а затем образцы также из двух партий, модифицированных при одинаковых режимах электроискрового легирования, т. е. $T_{имп}$ и $t_{имп}$. Образец № 1 из партии модифицированных в среде И-40 (см. рисунок 3.6) и образец № 1 – модифицированный в среде ПЭС-3 (см. рисунок 3.8) имеют примерно одинаковое содержание углерода – 4,0 %. При этом видим, что износостойкость образца № 1, модифицированного в среде И-40 (см. рисунок. 2.4, *а*), в два раза превосходит по износостойкости образец № 1, модифицированный в среде ПЭС-3 (см. рисунок 2.4, *б*).

Для объяснения полученных результатов проанализируем содержание вольфрама W, ат. %, на поверхности рассматриваемых образцов – см. рисунок 3.6 и рисунок 3.8. Видим, что содержание вольфрама на поверхности у образца № 1, модифицированного в среде И-40, составляет 4,0 %, а для образца № 1 – в среде ПЭС-3 составляет 2,7 %. Аналогичная картина наблюдается и для образцов другой пары: у образца № 5, модифицированного в среде И-40, содержание вольфрама на поверхности – 2,3 % (см. рисунок 3.6), а у образца № 5 (см. рисунок 3.8), модифицированного в среде ПЭС-3, – 3,5 %.

Сравнение данных образцов № 5, модифицированных в разных средах, показывает, что у образца № 5, модифицированного в среде ПЭС-3, количество вольфрама в 1,5 раза больше, чем у образца № 5, модифицированного в среде И-40. Анализ величины износостойкости (см. рисунки 2.4, *а* и *б*) подтверждает ее значительное превосходство у образца с большим содержанием вольфрама над образцом с меньшим содержанием вольфрама.

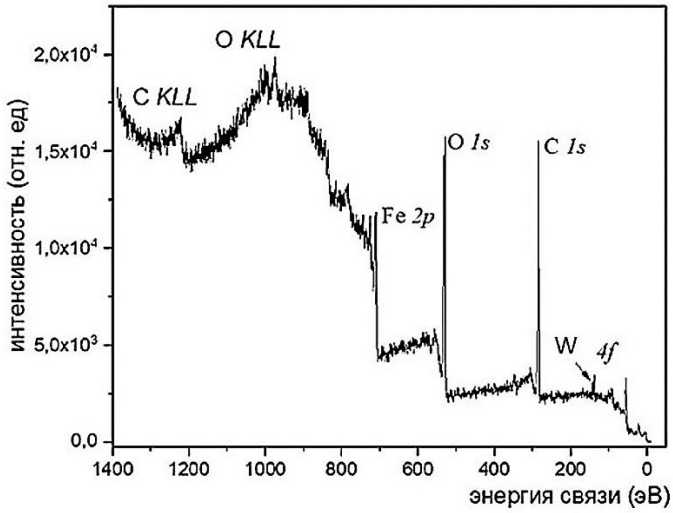
Для подтверждения того, что износостойкость определяется величиной вольфрама на трибоконтакте, проведем еще одно сравнение результатов трибологических испытаний пар: № 8 и № 9, модифицированных в среде И-40, и № 8 и № 9, модифицированных в ПЭС-3, при одинаковых режимах ЭИЛ – $T_{имп}$ и $t_{имп}$ с процентным содержанием вольфрама на поверхности этих образцов. Анализ показывает, что величина износа (см. рисунки 2.4, *а* и *б*) и процентное содержание вольфрама W, ат. %, для этих пар совпадают (см. рисунки 3.6 и 3.8), а содержание углерода – отличается (см. рисунки 3.7 и 3.9), что позволяет сделать вывод, что содержание вольфрама в большей степени оказывает влияние на износостойкость, чем углерода. Для объяснения механизма полученных результатов необходимо рассмотреть роль диффузионных процессов на трибоконтакте. Действительно, при фрикционном нагружении такой тяжелонагруженной трибосистемы, как изучаемый нами объект исследования – «пятник –подпятник» подвижного состава, в результате механодеструкции происходит диффузия продуктов деструкции вольфрама и углерода из модифицированной электроискровым легированием в жидких средах поверхности подпятника в контртело (пятник), способствуя его упрочнению либо разрушению в зависимости от энергии химической связи вольфрама и углерода с железом. С помощью методики квантово-химических расчетов оценим величину этой энергии с целью выяснения роли диффузионных процессов вольфрама и углерода в стальное контртело.

3.3 Квантово-химический анализ диффузионных процессов вольфрама и углерода в стальное контртело и расчет энергии их связи с металлическим контртелом

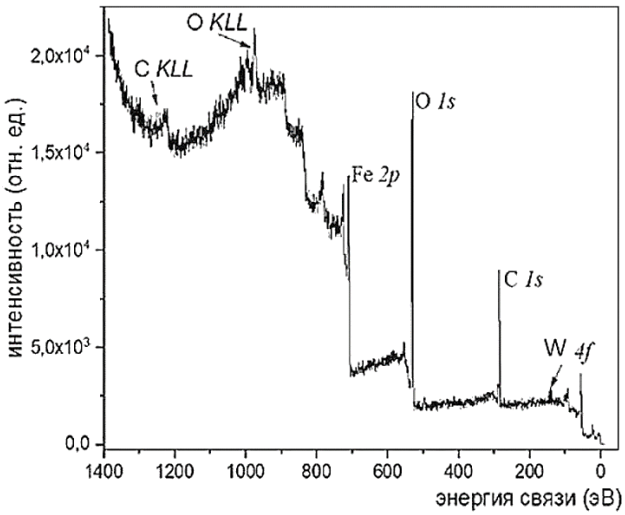
В результате фрикционного нагружения тяжелонагруженных трибосистем, подобных исследуемым нами – «пятник – подпятник» подвижного состава, происходит механодеструкция с выделением большого количества вольфрама и углерода, а также диффузия их в контактирующую стальную поверхность.

Для выяснения механизма формирования в поверхностном слое контактирующей поверхности (пятника) упрочняющих структур, способствующих повышению износостойкости, необходимо, во-первых, получить подтверждение диффузии вольфрама и углерода в контактирующую стальную поверхность, и затем провести численный расчет энергии связи атомов W и C с атомами Fe.

Для подтверждения такого механизма по упрочнению поверхности нами методом РФЭС на приборе SPECS проведены исследования химического состава и химической связи в поверхностных слоях образца из стали 45 после трения в двух средах: в среде углеводородов И-40 (образец № 2) и в полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-3 (образец № 5) (рисунок 3.12).



а

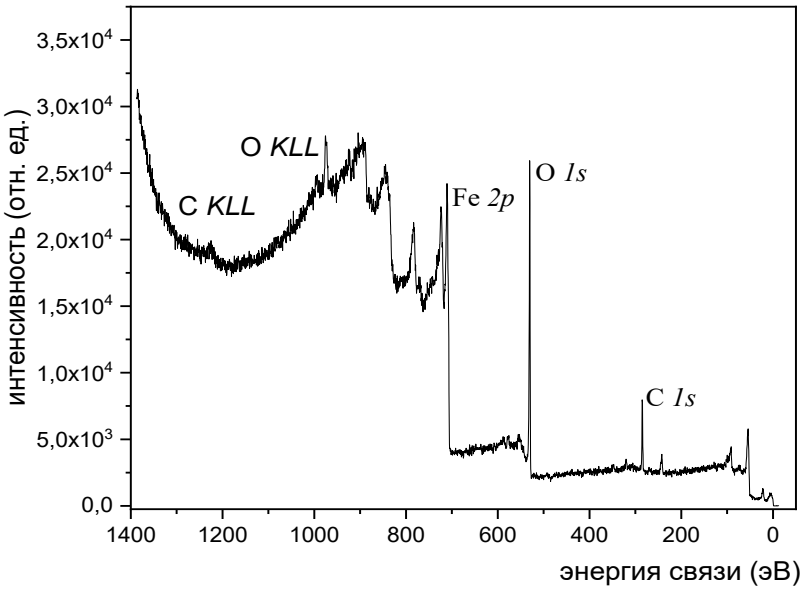


б

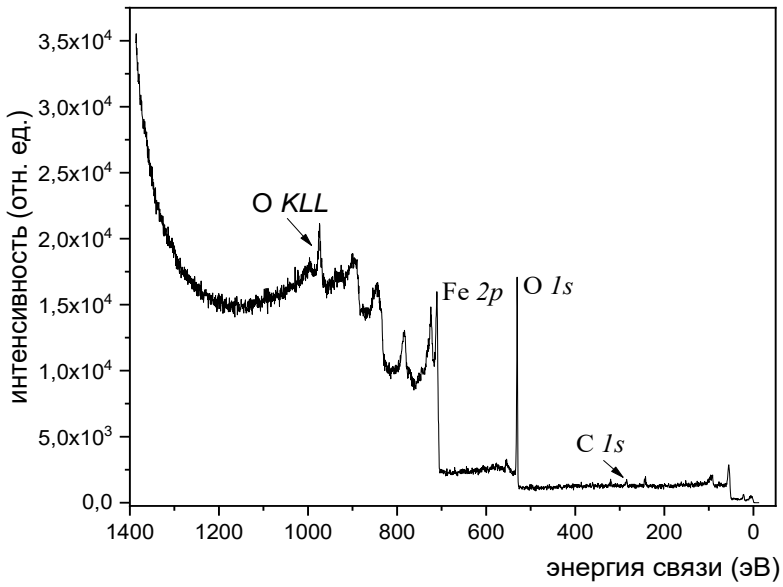
Рисунок 3.12 – Рентгеноэлектронный спектр поверхности после трения образца № 2, работающего в среде И-40 (*а*), в среде ПЭС-3 (*б*)

Образец № 2, прошедший модификацию в среде И-40, и образец № 5 – в среде ПЭС-3, имеющие максимальную износостойкость, будут исследованы после трибологических испытаний методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с использованием Mg–Kα-излучения при вакууме $9 \cdot 10^{-9}$ мбар.

На рисунках 3.12 и 3.13 представлены рентгеноэлектронные спектры поверхности образцов № 2 и № 5 после трения.



а



б

Рисунок 3.13 – Рентгеновский фотоэлектронный спектр поверхности после трения образца № 2, работающего в среде И-40, и после травления поверхности ионами аргона Ar^+ (*а*) и образца № 5 – в среде ПЭС-3 (*б*)

Анализ спектров показывает, что в состав поверхности входят железо, кислород, углерод и вольфрам. Интенсивность углерода в поверхности образца, проработавшего в углеводородной среде, значительно превосходит интенсивность углерода в поверхности образца, проработавшего в ПЭС-3.

Энергетическое положение линии 4f-уровня позволяет отнести ее к вольфраму, находящемуся в связи с углеродом. Поскольку на поверхности трения имеется большое количество углерода, особенно в среде индустриального масла, то можно охарактеризовать это упрочнение поверхностного слоя за счет связи вольфрама с углеродом и даже определить форму фрагмента – WC.

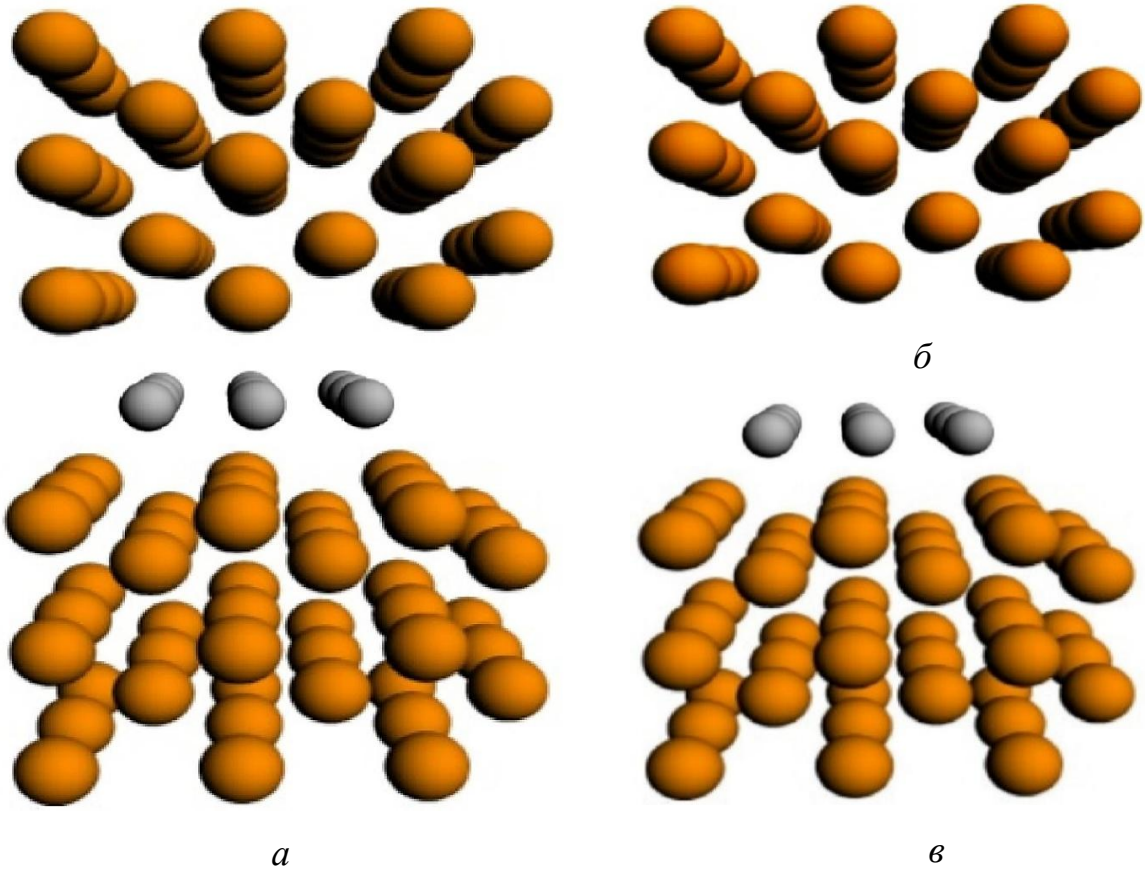
Для получения информации по оценке глубины проникновения атомов химических элементов с поверхности модифицированного слоя нами проведено ионное профилирование инертным газом Ar^+. Скорость травления равна 3 А/мин при токе пучка I = 10 мА и напряжении $U_{уск}$ = 2,99 кэВ и при давлении аргона равном $4{,}5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.

С целью выяснения глубины сформированного на поверхности упрочненного слоя из атомов вольфрама нами проведено травление образцов ионами Ar^+ на глубину 0,5 мкм [154]. Из рентгеновских спектров на рисунках 3.13, *а* и *б* после травления видно, что в составе поверхности присутствуют линии железа, кислорода, углерода, а атомов вольфрама не обнаружено. Отсутствие их связано, во-первых, с их малым содержанием, а во-вторых, с ограниченной чувствительностью метода РФЭС. Низкая элементная чувствительность рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии для линии 4f подтверждается тем, что методом энергодисперсионного анализа атомы вольфрама были обнаружены.

Анализ спектров образцов после ионной очистки показывает не только отсутствие атомов вольфрама, но значительное уменьшение углерода у образцов, проработавших в среде полиэтилсилоксановой жидкости – ПЭС-3, по сравнению с трением в среде углеводородов – И-40.

Учитывая, что узел трения представляет собой трибосистему, состоящую из поверхности, модифицированной вольфрамом, контактирующей со стальной

поверхностью, а между ними – органическая среда И-40 (на примере «подпятник – пятник» подвижного состава), нас интересует энергия связи $E_{св}$ кластера Fe с вольфрамом W и с углеродом C. Используя квантово-химический расчет методом DFT (Density Functional Theory) [156, 157], можем определить энергию распада (эВ) всего кластера, состоящего из 11-слойной периодической пластины, как наиболее приближенной к реальной границе трибоповерхности, состоящей из 5 нижних и 5 верхних пластин железа, а между ними – адсорбированные атомы углерода C или вольфрама W. Будем называть этот кластер сегрегационным (рисунок 3.14, *а*), и его энергия связи $E_{с} = -132{,}9$ эВ при наличии углерода C, для вольфрама $E_{с} = -133{,}4$ эВ. В результате трения этот кластер распадается на два – «чистое железо Fe» (рисунок 3.14, *б*) с энергией $E_{ж} = -85{,}5$ эВ, и кластер «железо с атомами углерода C или вольфрама W», называемый адсорбционным (рисунок 3.14, *в*).



б

а *в*

Рисунок 3.14 – Модель 11-слойной пластины с пятью слоями железа внизу и вверху и слоем из атомов вольфрама или углерода между ними

Согласно исследованиям [158] получена зависимость энергии связи $E_{св}$ от числа n атомов в кластере, и уже при $n = 18$ значение $E_{св}$ стабилизируется, а нами выбран кластер железа из 10 слоев атомов железа. Энергия связи адсорбционного кластера $E_а$ углерода с железом составляет $E_а = -45{,}2$ эВ, а энергия адсорбционного кластера W с железом $E_а = -45{,}1$ эВ. Имея исходный сегрегационный кластер из 99 атомов (90 атомов Fe и 9 атома W или C), находим их энергию связи – $E_{св}$, затем энергию адсорбционного кластера из 45 атомов Fe и девяти атомов W или C, и, учитывая энергию связи для чистого железа $E_ж = -85{,}5$ эВ, можем вычислить энергию распада $E_р$ исходного кластера:

$$E_р = |E_с - E_а - E_ж|. \quad (3.1)$$

В результате проведенных квантово-химических расчетов энергии связи получено: энергия связи адсорбционного кластера углерода с железом составляет $E_а = -45{,}2$ эВ, а энергия распада $E_р = 2{,}2$ эВ; для вольфрама с железом $E_а = -45{,}1$ эВ, а $E_р = 2{,}3$ эВ, для атомов железа $E_а = -45{,}7$ эВ, а $E_р = 1{,}7$ эВ.

Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что атомы вольфрама W и углерода C имеют энергию связи с железом больше, чем у самого железа Fe–Fe, и могут служить упрочняющими поверхность трения добавками, повышая износостойкость трибосистемы.

В результате исследования морфологии, элементного и химического состава, а также квантово-химического расчета энергии связи поверхностных структур образцов, прошедших модификацию методом ЭИЛ в жидких средах, возможно предложить следующий механизм упрочнения поверхности трибоконтакта:

1 При электроискровом легировании (ЭИЛ) на контактной поверхности стального изделия имеет место чисто термическое воздействие, при этом температура в искровом разряде достигает нескольких тысяч градусов. Этой энергии достаточно, чтобы произошли испарение и ионизация атомов вольфрамового катода. В то же время искровой разряд приводит к деструкции *«изолирующей жидкости»* с выделением углерода. В зависимости от режима

ЭИЛ взаимодействие вольфрама с углеродом может происходить на поверхности обрабатываемого стального изделия или в его поверхностном слое. И в том и в другом случае результатом такого взаимодействия будет карбид вольфрама WC. Однако при поверхностном взаимодействии на изделии будет формироваться *карбидное покрытие WC*, а при взаимодействии внутри стали (в поверхностном слое изделия) будут формироваться *дисперсные карбиды WC*, реализуя *дисперсионный механизм упрочнения* стали. В этом, последнем случае образованию карбидов предшествует адсорбция атомов/ионов W и C на поверхности стали в виде моноатомного слоя или атомных кластеров с последующим диффузионным насыщением ими поверхностного слоя изделия и образованием карбидов в слое по механизму зарождения фаз и их фронтального роста в твердом кристаллическом теле. Для протекания этих процессов концентрация W и C на поверхности стали должна быть достаточно высокой, поверхностный слой должен быть прогрет до весьма высоких температур, а концентрация W и C в нем должна быть градиентной.

2 При трении на контактной поверхности стали и в поверхностном слое имеет место термомеханическое воздействие, причем энерговыделение значительно меньше, чем при искровом разряде ЭИЛ (в том числе и за счет диссипации энергии). За счет термомеханодеструкции в зоне контактирования выделяются атомы вольфрама, которые замещают атомы Fe в узлах кристаллических решеток феррита, делая их соответственно легированным твердым раствором $Fe_{\alpha}(W)$ и тем самым достигается упрочняющий эффект поверхности трисопряжения.

Следует обратить внимание и отметить, что при большой нагрузке и температуре на контакте тяжелонагруженной трибосистемы (подобно рассматриваемой нами – «пятник – подпятник»), работающей в органической среде И-40, где одна поверхность трибосопряжения (подпятник) модифицирована вольфрамом с помощью ЭИЛ, а контртело – другая поверхность (пята)

представляет Ст-45, за счет термомеханодеструкции выделяются С и W, диффундирующие в стальное контртело.

3.4 Выводы по главе 3

1 Результаты рентгеновской фотоэлектронной и ИК-спектроскопии показывают, что разработанная нами модификация поверхности трибосопряжений методом электроискрового легирования в жидких средах является барьером от окислительных процессов при ЭИЛ.

2 Исследование морфологии и элементного состава поверхностей трибосопряжений, модифицированных ЭИЛ вольфрамовым электродом в жидких средах, и сравнение с трибологическими характеристиками этих покрытий показывает, что износостойкость покрытий зависит от величины содержания вольфрама на трибоконтакте. Так, износ образца, модифицированного в среде И-40 с содержанием вольфрама на поверхности W = 6,0 вес. %, в два раза меньше износа образца, модифицированного в среде ПЭС-3 с содержанием вольфрама W = 0,7 вес. %.

3 Путем применения РФЭС и квантово-химических расчетов установлено, что при трении модифицированной вольфрамом поверхности металлического контртела за счет термомеханодеструкции в зоне контактирования выделяются атомы вольфрама, которые замещают атомы Fe в узлах кристаллических решеток феррита, делая их соответственно легированным твердым раствором $Fe_{\alpha}(W)$ и тем самым достигается упрочняющий эффект поверхности трисопряжения.

Глава 4. ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПРИСАДКИ ДВОЙНОГО МЕТАФОСФАТА КАЛЬЦИЯ И ЦИНКА, НИКЕЛЯ И ЦИНКА НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ УЗЛА ТРЕНИЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ НАГРУЗОК И СКОРОСТЕЙ

Анализ научных работ по электроискровому легированию, представленный в главе 1, показывает, что к настоящему времени нет полного объяснения роли жидкой среды – пластичных смазочных материалов и добавок к ним – в механизме образования вторичных структур – пленок переноса на металлическое контртело при электроискровом легировании.

В первую очередь это можно объяснить тем, что не был проанализирован весь путь структурной приспосабливаемости – на первом этапе трибосистема находится в неустойчивом состоянии, что приводит к росту энтропии, и система в соответствии с первым законом термодинамики стремится к пассивации.

Далее благодаря взаимодействию со средой трибосистема переходит в метастабильное – равновесное состояние с образованием вторичных структур, что приводит к уменьшению энтропии и, следовательно, самоорганизации.

В нашем случае главной задачей является определить механизм образования пленок переноса на поверхности трения – вторичных структур при наличии пластичных смазочных материалов и полифосфатных присадок.

Также одним из полученных в обзорном разделе данной работы (см. п. 1.3) на основе выполненного анализа выводов является то, что наиболее перспективными противоизносными и противозадирными присадками могут служить вещества неорганической природы с олеофильными свойствами – способностью растворяться в маслах, у которых в молекуле отсутствуют органические радикалы, инициирующие деструктивные процессы в смазочных материалах. К такому типу присадок относятся гетерополифосфаты и конденсированные метафосфаты щелочных металлов, имеющие циклическую

структуру молекулы. На базе анализа научных данных можно сделать вывод, что не менее перспективным направлением является поиск и синтез нового вида присадок двойных метафосфатов, представляющих собой не циклическую, а линейную форму молекулы с более высокой степенью полимеризации.

4.1 Синтез неорганических присадок двойных метафосфатов кальция и цинка, никеля и цинка

Новые вещества двойных метафосфатов были найдены при исследовании фазовых диаграмм [159–162].

Получение двойных метафосфатов происходило в следующей последовательности:

1 Синтез метафосфата кальция осуществлялся из реактивов марки *чистый для анализа* (ч.д.а.) однозамещенного ортофосфата аммония (ГОСТ 3771-74) и азотнокислого 4-водного кальция (ГОСТ 4142-77) по следующей химической реакции:

$$Ca(NO_3)_2 + 2NH_4H_2PO_4 \xrightarrow{t^o} Ca(PO_3)_2 + 2NH_3 + 2NO_2 + \frac{1}{2}O_2 + 3H_2O.$$

Исходные реактивы, представляющие собой вещества в виде кристаллогидратных порошков, на первоначальной стадии синтеза тщательно перемешиваются в химической посуде до получения однородной массы, при этом в процессе перемешивания происходит постепенный переход смеси из порошкообразного состояния в густой коллоидный раствор высокой вязкости. Полученный раствор перекладывается в платиновый тигель, представляющий собой чашу полусферической формы. На электрической плите с помощью специальной фиксирующей оснастки раствор в тигле доводят до температуры около 150…200 °С, интенсивно перемешивая до прекращения активного газообразования на завершающей стадии перемешивания. Далее тигель с раствором помещается в предварительно разогретую до температуры 300…400 °С камеру муфельной печи, затем температура постепенно увеличивается до 1000 °С,

и при этой температуре раствор выдерживается в течение 1 часа, после чего тигель извлекается (рисунок 4.1, *б*) и резко охлаждается путем контакта стенок тигля с холодной водой. Таким образом, получается конденсированный метафосфат кальция, представляющий собой прозрачный и твердый кристалл стеклообразного состояния (рисунок 4.1, *в*). Следует отметить, что процесс нагрева в муфельной печи в интервале температур 350…600 °С и выше сопровождается увеличением объема раствора в тигле (рисунок 4.1, *а*) с активным выделением воды, аммиака, оксида азота и кислорода, что объясняется сложными процессами образования фосфатов, которые происходят ступенчато и завершаются прекращением термической дегидратации с увеличением температуры в печи.

Рисунок 4.1 – Процесс синтеза двойных метафосфатов:
а – этап дегидратации; *б* – расплав перед конденсацией;
в – метафосфат кальция; *г* – метафосфат никеля

Полученный метафосфат подвергается тщательному измельчению до порошкообразного состояния с помощью лабораторной ступки с пестиком или с помощью планетарной мельницы сухого помола Fritsch Pulverisette 6 (Германия).

2 Синтез метафосфата цинка осуществлялся аналогичным способом из реактивов марки ч.д.а. однозамещенного ортофосфата аммония и азотнокислого цинка (ГОСТ 5106-77) по следующей химической реакции:

$$Zn(NO_3)_2 + 2NH_4H_2PO_4 \xrightarrow{t^o} Zn(PO_3)_2 + 2NH_3 + 2NO_2 + \frac{1}{2}O_2 + 3H_2O.$$

Процесс также сопровождается активным выделением воды, аммиака, оксида азота. Расплав спекшейся массы начинает происходить при температуре 862 °С. Далее при температуре в муфельной печи 950 °С расплав выдерживается в течение 0,5 ч, затем вынимается и резко охлаждается. Полученный метафосфат цинка, аналогично метафосфату кальция, представляет собой твердые прозрачные кристаллы.

3 Синтез метафосфата никеля осуществляется аналогично синтезу метафосфата кальция, из однозамещенного ортофосфата аммония и азотнокислого никеля (ГОСТ 4055-78), но требуется более длительный процесс дегидратации, а синтез происходит при более высокой температуре 1280 °С:

$$Ni(NO_3)_2 + 2NH_4H_2PO_4 \xrightarrow{t^o} Ni(PO_3)_2 + 2NH_3 + 2NO_2 + \frac{1}{2}O_2 + 3H_2O.$$

Полученный метафосфат никеля представляет собой кристаллы прозрачно-зеленого цвета (рисунок 4.1, *г*).

4 Завершающий этап синтеза двойного метафосфата, заключается в соединении в одну молекулу полученных метафосфатов по следующей химической реакции:

$$Me^{I}(PO_3)_2 + Me^{II}(PO_3)_2 \rightarrow M^{I}M^{II}(PO_3)_4,$$

где Me^{I} –катионы Ca или Ni; Me^{II} –катион Zn.

Рассмотрим синтез присадки двойного метафосфата «кальций-цинк»:

$$Ca(PO_3)_2 + Zn(PO_3)_2 \rightarrow CaZn(PO_3)_4.$$

Измельченные до порошкообразного состояния метафосфаты кальция и цинка смешиваются, в платиновом тигле сплавляются в муфельной печи. При температуре 1000 °С расплав выдерживается 2 ч, далее тигель вынимается и резко охлаждается. Полученный метафосфат кальция и цинка представляет собой стеклообразную массу прозрачного цвета, которая измельчается до порошкообразного состояния. Готовое вещество – порошок белого цвета, которое добавляется в пластичные смазочные материалы в количестве от 0,5 до 5 % от общей массы.

Все исходные реактивы для синтеза в том числе и двойных метафосфатов используются в стехиометрическом соотношении.

Идентификацию молекул – их структуру и реакционную способность полученных соединений, осуществляли с помощью квантово-химических расчетов в программном комплексе Amsterdam Density Functional (ADF).

На рисунке 4.2 представлена структура молекулы присадки $CaZn[(PO_3)_4]_\infty$, исследованная с помощью пакета ADF.

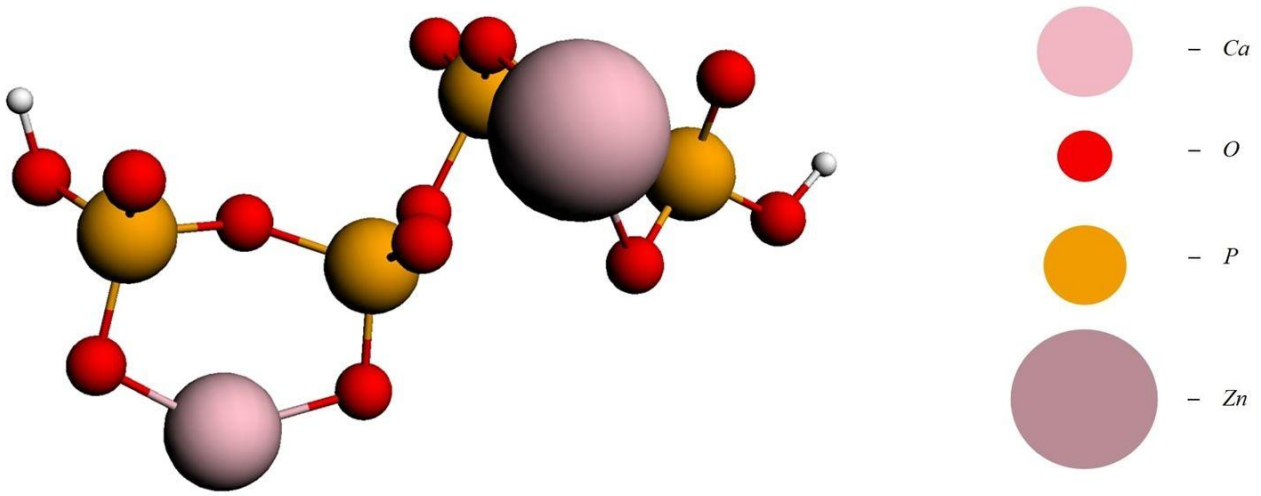


Рисунок 4.2 – Молекула присадки $CaZn[(PO_3)_4]_\infty$

По типу аниона и структуре полученное соединение относится к двойным метафосфатам. С точки зрения исследованной структуры молекулы, представляющей собой линейное строение чередующихся связей – P – O – P– с входящими в состав катионами кальция и цинка (см. рисунок 4.2), данное соединение может относиться и к полифосфатам, так как образует неорганическую полимерную молекулу с высокой степенью полимеризации. Следует отметить, что данный вид молекулы не является циклической структурой.

Понимая, что для повышения износостойкости трибосопряжений перспективным является применение разработанных нами присадок – двойных метафосфатов, и реализация образования вторичных структур в зоне контакта,

зависящая от энергии связи с поверхностью металла, нами были проведены квантово-химические расчеты [162] фрагментов молекулы присадки с катионной цепочкой (рисунок 4.3) и анионной (рисунок 4.4), а также для сравнения получены расчетные значения энергии связи с железом высших жирных кислот (рисунок 4.5). Расчет проводили с кластером железа, состоящим из 13 атомов.

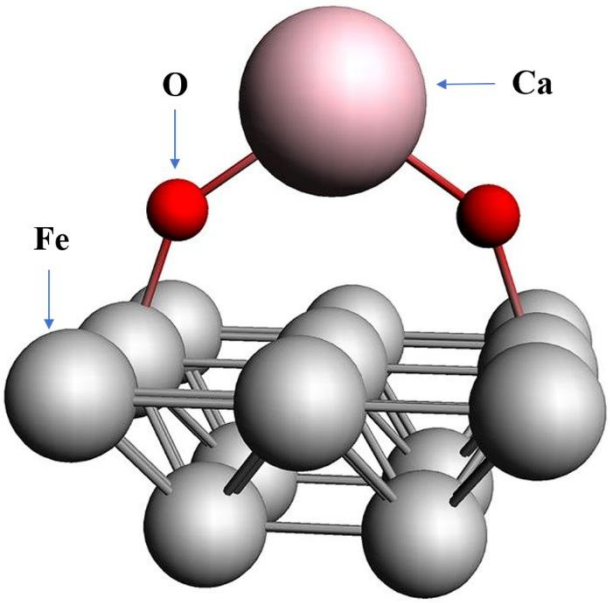


Рисунок 4.3 – Модель поверхности железа и фрагмента молекулы присадки с фрагментом катиона CaO_2

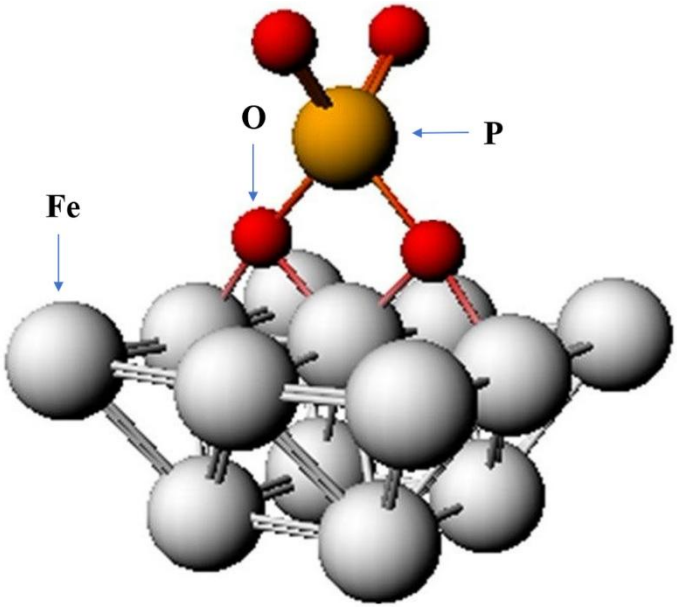


Рисунок 4.4 – Модель поверхности железа и фрагмента молекулы присадки с фрагментом аниона PO_4

Рисунок 4.5 – Расчетные значения энергия связи с железом:

– высших жирных кислот;

– фрагмент молекулы с цепочкой CaO_2;

– фрагмент молекулы с цепочкой PO_4;

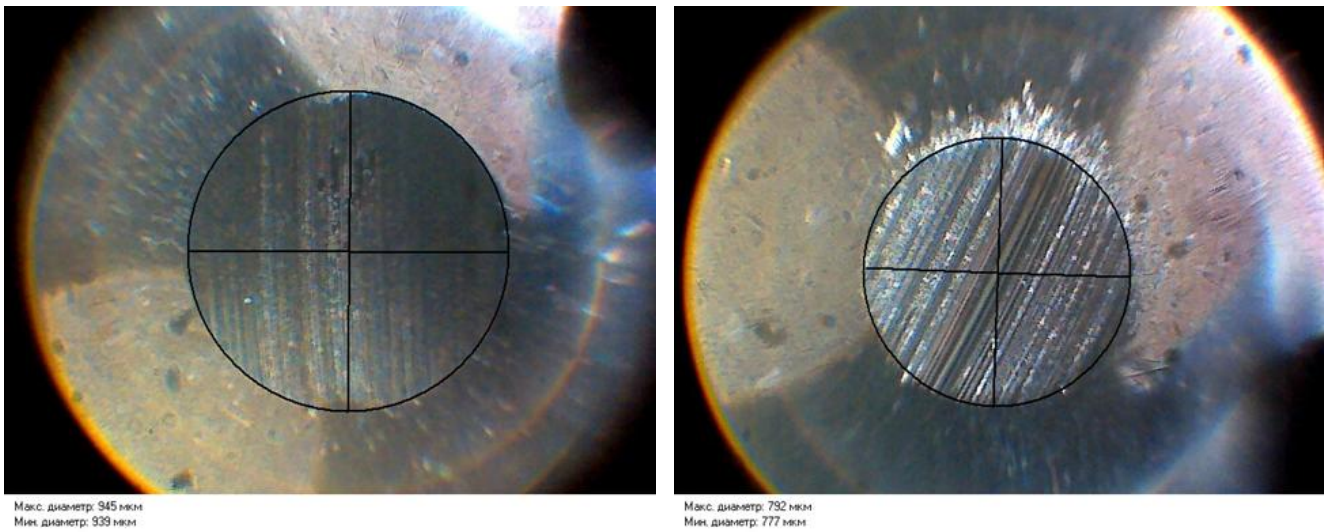
Из проведенных расчетов и изучения молекулярной структуры можно сделать вывод, что смазочная способность присадки – эффект образования вторичных (пленочных) структур, объясняется склонностью линейной молекулы к деполимеризации в результате возрастания энтропии в процессе трибохимических реакций, инициируемых в условиях граничного трения. А образование пленок (вторичных структур) происходит вследствие факторов равновесно-неравновесных состояний в трибосистеме по правилу Ле-Шателье – взаимодействие структуры металла и смазочной среды на границе раздела фаз с последующим образованием новых структур [163].

Квантово-химические расчеты энергии связи и реакционной способности молекулы $CaZn[(PO_3)_4]_\infty$ с поверхностью металла – кластерами железа, состоящими из 13 атомов позволили установить, что энергия связи данной молекулы составляет для фрагментов CaO_2 = 10 эВ, для PO_4 = 10,1 эВ, а энергия связи высших жирных кислот (группа $-COOH-$) с железом = 7,1 эВ, что

обеспечивает повышение эффективности предложенной присадки, более чем на 30 %.

Дальнейший этап настоящего исследования заключался в проведении лабораторных физико-химических и трибологических испытаний. Нами проводились испытания пластичных смазочных материалов на четырехшариковой машине трения ЧМТ-1 согласно ГОСТ 9490-75. Длительность проведения испытаний для пластичных смазочных материалов ПУМА и БУКСОЛ составляла 60 мин при нагрузке 196 Н. В пластичные смазочные материалы в количестве от 0,5 до 5 % от общей массы вводились синтезированные присадки двойных метафосфатов. При этом следует отметить, что при испытании на четырехшариковой машине трения диаметр пятна износа определяется как среднее значение на трех шариках из каждого проведенного испытания.

Ниже представлены результаты измерений диаметра пятна износа после трибологических испытаний на примере пластичной смазочной композиции ПУМА-МЛ без присадки и с введенной присадкой $NiZn[(PO_3)_4]_\infty$ в количестве 0,5 масс. % (рисунок 4.6).



а *б*

Рисунок 4.6 – Диаметр пятна износа:

а – ПУМА-МЛ в чистом виде; *б* – ПУМА-МЛ с присадкой $NiZn[(PO_3)_4]_\infty$ в количестве 0,5 масс. %

Определение диаметра пятна износа после проведения испытаний осуществлялось с помощью оборудования, разработанного профессором С. Ф. Ермаковым в Государственном научном учреждении «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси» (ИММС НАН Беларуси).

В состав оборудования входят микроскоп WF10X с 100-кратным увеличением, встроенная цифровая видеокамера с прилагаемым программным обеспечением Colormix, позволяющим получать изображения и производить измерения диаметра пятна износа.

Диаметр пятна износа шарика из стали ШХ-15 при испытании смазочной композиции ПУМА-МЛ без присадки находится в пределах 939…945 мкм, а веденной присадкой в количестве 0,5 масс. %, износ составил 777…792 мкм.

Помимо смазочной композиции ПУМА нами проведены физико-химические и трибологические исследования с Буксолом, которые подтвердили эффективность разработанных присадок $CaZn(PO_3)_4$ и $NiZn(PO_3)_4$. Так, в таблице 4.1 представлены результаты испытаний смазочных композиций ПУМА и БУКСОЛ [170].

Таблица 4.1 – Результаты испытаний смазочных композиций ПУМА и БУКСОЛ

Показатель	Пума (нормативные)			Пума с присадкой $CaZn(PO_3)_4$ 1 масс. %			Пума с присадкой $NiZn(PO_3)_4$ 1 масс. %			Буксол	Буксол с присадкой $CaZn(PO_3)_4$ 1 масс. %	Буксол с присадкой $NiZn(PO_3)_4$ 1 масс. %
	МР	МГ	МЛ	МР	МГ	МЛ	МР	МГ	МЛ			
Температура каплепадения, $^{\circ}C$ (ГОСТ 6793-74)	174	172	199	182	180	210	242	236	250	180	192	225
Пенетрация при 25 $^{\circ}C$, мм, 60 дв. контактов (ГОСТ 5346-78)	368	310	320	378	314	328	370	315	322	230…290	262	249
Коллоидная стабильность, % (ГОСТ 7142-74)	36,5	21,5	30,7	27,0	16,2	16,2	22,0	15,0	16,2	20,6	10,5	8,5

окончание таблицы 4.1

Коррозионное воздействие на металлы (ГОСТ 9.080-77)	Выдерживает			Выдерживает			Выдерживает			Выдерживает		
Массовая доля воды, % (ГОСТ 2477)	Отсутствует			Отсутствует			Отсутствует			Отсутствует		
Массовая доля свободных органических кислот, мг КОН на 1 г смазки (ГОСТ 6707)	Отсутствует			Отсутствует			Отсутствует			5,0	Отсутствует	Отсутствует
Содержание механических примесей, % (ГОСТ 6479)	Отсутствует			Отсутствует			Отсутствует			Отсутствует		
Показатель пятна износа при нагрузке 196 Н, мм (ГОСТ 9490-75)	0,69	0,68	0,64	0,48	0,48	0,41	0,41	0,40	0,38	0,51	0,42	0,40

В результате проведенных исследований смазочных композиций с присадками было отмечено улучшение физико-химических и трибологических свойств смазочных композиций: температуры каплепадения, пенетрации, коллоидной стабильности, противоизносных показателей по диаметру пятна износа.

4.2 Исследование влияния процентного содержания присадки и нагрузочно-скоростных режимов на величину износа трибосистемы

Следующим этапом исследования являлось проведение испытаний метода повышения износостойкости поверхностного слоя трибосопряжения для металлических трибосистем, включающего обработку методом электроискрового легирования в индустриальном масле И-40 вольфрамовым электродом FUBAG серии WP и использование пластичных смазочных материалов, содержащих эффективные присадки, способствующие образованию вторичных структур на металлическом контртеле.

Объектом исследований выступали образцы из стали 30Х13 после обработки методом электроискрового легирования в индустриальном масле И-40. Для ЭИЛ применялся вольфрамовый электрод (содержание вольфрама не менее 99,5 %) диаметром 2,4 мм марки WL1 green WP (FUBAG). Использование индустриального масла И-40 эффективно предохраняет поверхность стали и электрода от окисления в процессе ЭИЛ. Трибологические испытания проводились на модернизированной машине трения СМТ-1 при контакте пластины из стали 30Х13, закрепленной в нагрузочном рычаге с роликом ∅ 40 мм из стали Ст. 45, установленном на ведущем валу СМТ-1 (рисунок 4.7, *а*). Испытания проводились по схеме «вал – вкладыш», где вал – ролик, вкладыш – пластина (рисунок 4,7, *б*) с использованием метода планирования эксперимента.

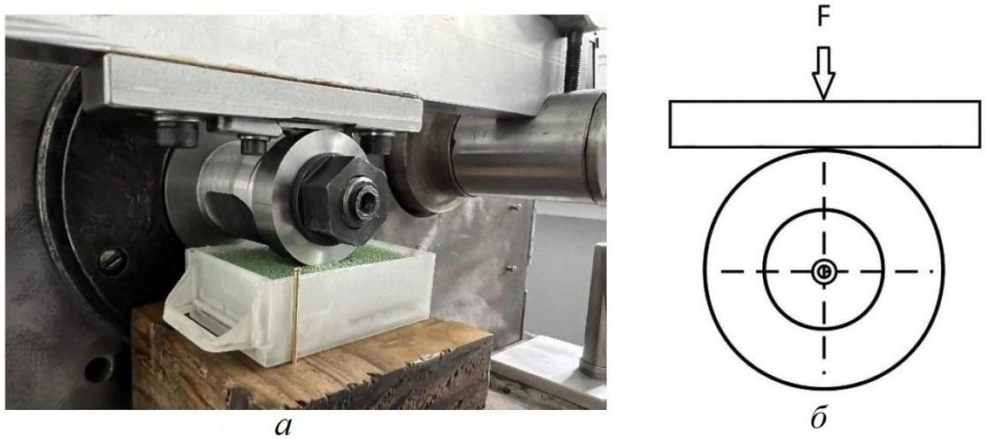


Рисунок 4.7 – Трибологические испытания на машине трения СМТ-1: узел трибоконтакта (*а*); схема «ролик – пластина» (*б*)

В соответствии с матрицей ортогонального центрального композиционного плана второго порядка для каждого цикла испытаний выбиралась постоянная нагрузка в зоне контакта F = 300, 500 и 700 Н, при постоянной линейной скорости скольжения 0,1, 0,2 и 0,3 м/с. Длительность испытания составляла 8 ч. Нагрузочно-скоростные режимы были выбраны из соответствия реальным условиям работы трибосопряжения.

Наиболее важным параметром покрытий триботехнического назначения является их износостойкость. В нашем случае параметром износостойкости выступает глубина лунки износа. В процессе роста лунки увеличивается фактическая площадь трения. Геометрические размеры износа определялись при помощи цифрового микроскопа Dino-Lite в трех местах (DL0, DL1, DL2), с последующим вычислением среднего значения (рисунок 4.8).

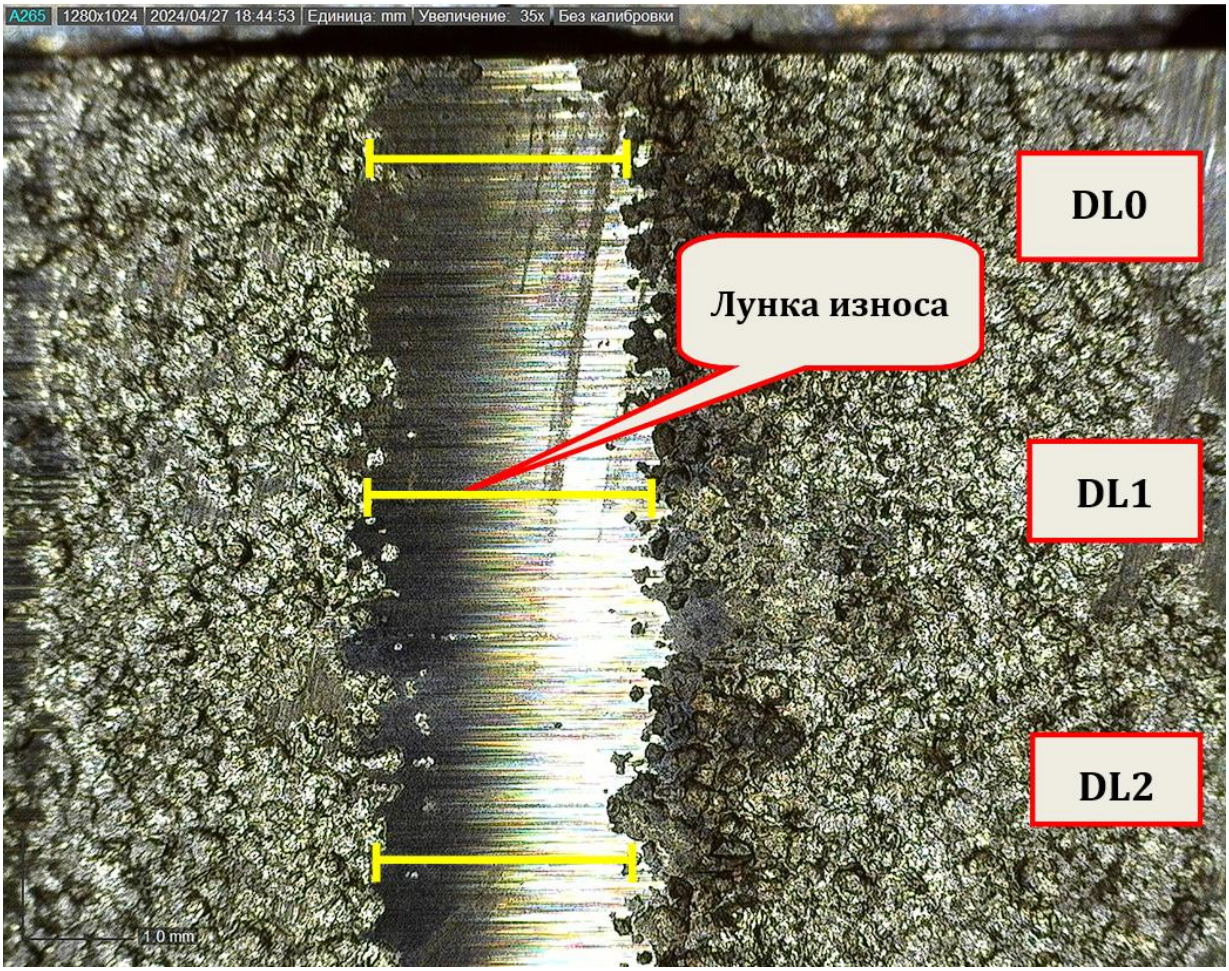


Рисунок 4.8 – Износ пластины (увеличение ×35)

Для контроля ширины l лунки износа осуществлялось размыкание трибопары с периодичностью в 60 мин. Ширина лунки износа (l) представляет собой основание равнобедренного треугольника, вершиной которого является центр ролика, следовательно, глубина сегмента (h) износа определяется как разность радиуса ролика и высоты треугольника по основанию и определяется по формуле:

$$h = R - \sqrt{R^2 - \frac{l^2}{4}},$$

где R – радиус ролика.

Результаты трибологических испытаний приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Сводная таблица планирования эксперимента и результаты трибологических испытаний

ЭИЛ, смазочный материал ПУМА-МР без присадки, рисунок 4.9						
Уровни факторов		Кодовые значения		Условия проведения испытаний		
		x_1	x_2	Нагрузка N, Н	Скорость V, м/с	
Основной уровень		0	0	500	0,2	
Интервал варьирования		±1	±1	200	0,1	
Нижний уровень		–1	–1	300	0,1	
Верхний уровень		+1	+1	700	0,3	
№	Условия проведения испытаний		Ширина лунки износа l, мм	Глубина лунки износа h, мкм		
	N, Н	V, м/с				
2	300	0,1	3,23	65,4		
5	700	0,1	3,97	98,9		
7	300	0,3	2,32	33,7		
12	700	0,3	3,23	65,3		
14	300	0,2	2,40	36,0		
16	700	0,2	3,25	66,2		
21	500	0,1	3,26	66,6		
23	500	0,3	2,04	25,9		
27	500	0,2	2,26	31,9		
ЭИЛ, смазочный материал ПУМА-МР с присадкой, рисунки 4.10 … 4.12						
Уровни факторов		Кодовые значения			Условия проведения испытаний		
		x_1	x_2	x_3	Нагрузка N, Н	Скорость V, м/с	Присадка P, %
Основной уровень		0	0	0	500	0,2	3
Интервал варьирования		±1	±1	±1	200	0,1	2
Нижний уровень		–1	–1	–1	300	0,1	1
Верхний уровень		+1	+1	+1	700	0,3	5

Окончание таблицы 4.2

№	Условия проведения испытаний			Ширина лунки износа *l*, мм	Глубина лунки износа h, мкм
	N, Н	V, м/с	Присадка Р, %		
28	300	0,1	1	0,339	0,717
32	300	0,1	5	0,251	0,393
33	700	0,1	1	0,451	1,273
38	700	0,1	5	0,388	0,940
40	300	0,3	1	0,330	0,680
42	300	0,3	5	0,229	0,327
47	700	0,3	1	0,432	1,167
49	700	0,3	5	0,378	0,893
51	500	0,2	0,57	0,385	0,927
53	500	0,2	5,43	0,285	0,507
57	257	0,2	3	0,262	0,430
61	743	0,2	3	0,430	1,153
62	500	0,08	3	0,184	0,211
67	500	0,32	3	0,150	0,140
71	500	0,2	3	0,225	0,317

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что при использовании смазочного материала ПУМА-МР без присадки на поверхности, не подвергавшейся модификации, износ имеет существенную тенденцию роста. Следовательно, функционирование типового узла подсистемы «пятник – подпятник» в среде смазочного материала ПУМА-МР без присадки не обеспечивает необходимую долговечность работы. При обработке поверхности пластины методом электроискрового легирования износ фрикционной системы существенно снижается. При добавлении присадки к смазочному материалу ПУМА-МР в течение первых трех часов наблюдается процесс приработки – на поверхностях трения формируются вторичные структуры. При дальнейших испытаниях износ пластины стабилизируется и уровень износа существенно снижается. Оптимизация состава смазочного материала ПУМА-МР проводилась методом планирования эксперимента. На первом этапе исследований выполнен анализ влияния эксплуатационных режимов на износостойкость покрытия, нанесенного методом ЭИЛ, в случае использования смазочного материала ПУМА-МР без присадки. Исследование проводилось с помощью метода планирования эксперимента (ортогональный план второго порядка). Дисперсии параллельных опытов оказались

однородными (критерий Кохрена удовлетворяется). Дисперсия воспроизводимости и средняя квадратичная ошибка эксперимента приведены ниже:

$$\sigma^2 = 16{,}7; \quad \sigma(h) = 4{,}1.$$

Анализ матрицы планирования эксперимента позволил построить математическую модель процесса, где в качестве выходного параметра рассмотрена глубина лунки износа, а факторы – рассматриваемые эксплуатационные параметры:

$$I(h) = 207{,}1 - 0{,}41N - 760{,}1V + 0{,}00049N^2 + 1458{,}7V^2.$$

Полученное уравнение регрессии удовлетворяет критерию Фишера: адекватно при уровне значимости 0,05.

На рисунке 4.9 представлена геометрическая интерпретация полученной математической модели влияния нагрузочно-скоростных условий эксплуатации фрикционной подсистемы «ролик – пластина» на величину износа I, мкм.

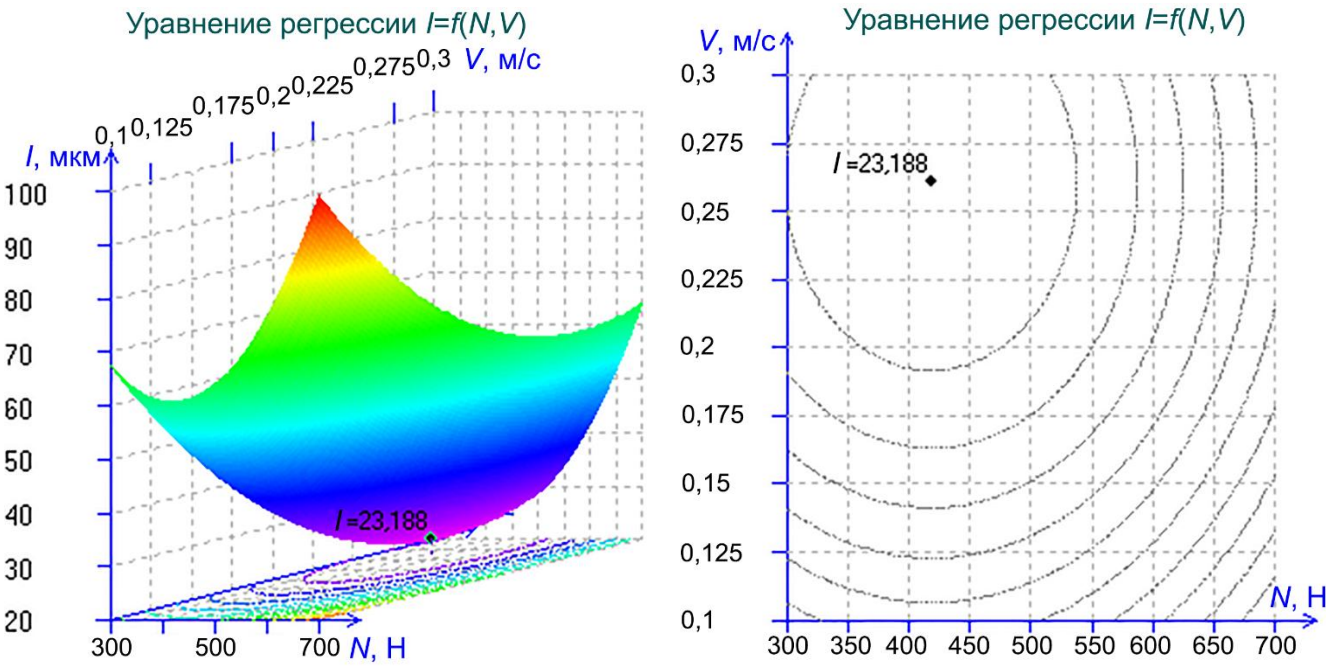


Рисунок 4.9 – Геометрическая интерпретация уравнения регрессии по влиянию нагрузки N скорости V на глубину лунки износа I, мкм

Анализ регрессионной модели показывает, что:

1) исходная фрикционная поверхность пластины (подпятника) не в полной мере обеспечивает износостойкость трибосопряжения, так как при максимальной нагрузке $N = 700$ Н и минимальной скорости скольжения $V = 0{,}1$ м/с глубина лунки износа максимальна $I = 99{,}3$ мкм;

2) в заданной области эксплуатационных параметров минимальная глубина лунки износа $I = 23{,}2$ мкм наблюдается при нагрузке $N = 418$ Н и скорости относительного скольжения $V = 0{,}26$ м/с;

3) с увеличением нагрузки N параметр оптимизации I растет, а с увеличением скорости относительного скольжения V он снижается;

4) по степени влияния нагрузки и скорости на глубину лунки износа большее влияние оказывает скорость.

На втором этапе исследований с целью увеличения ресурса работы трибосопряжения, в рамках комплексной методики совершенствования узла «пятник – подпятник», была выполнена оптимизация процентного содержания присадки двойного метафосфата кальция и цинка к смазочному материалу ПУМА-МР. Был выбран трехфакторный эксперимент: в качестве третьего фактора рассматривается процентное содержание присадки к смазочному материалу (уровни варьирования от 1 до 5 %, интервал варьирования 2 %).

Составлена матрица планирования трехфакторного эксперимента, приведенная в таблице 4.3.

Выполнен расчет результатов трехфакторного эксперимента в соответствии с условиями их проведения по таблице 4.3. Дисперсии параллельных опытов оказались однородными (критерий Кохрена удовлетворяется).

Дисперсия воспроизводимости и средняя квадратичная ошибка эксперимента приведены ниже:

$$\sigma^2 = 2{,}6 \cdot 10^{-3};\ \sigma(h) = 0{,}051.$$

Таблица 4.3 – Матрица планирования трехфакторного эксперимента

№	x_0	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_1^2	x_2^2	x_3^2
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+0,27	+0,27	+0,27
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+0,27	+0,27	+0,27
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+0,27	+0,27	+0,27
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+0,27	+0,27	+0,27
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+0,27	+0,27	+0,27
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+0,27	+0,27	+0,27
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+0,27	+0,27	+0,27
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+0,27	+0,27	+0,27
9	+1	-1,22	0	0	0	0	0	+0,75	-0,73	-0,73
10	+1	+1,22	0	0	0	0	0	+0,75	-0,73	-0,73
11	+1	0	-1,22	0	0	0	0	-0,73	+0,75	-0,73
12	+1	0	+1,22	0	0	0	0	-0,73	+0,75	-0,73
13	+1	0	0	-1,22	0	0	0	-0,73	-0,73	+0,75
14	+1	0	0	+1,22	0	0	0	-0,73	-0,73	+0,75
15	+1	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73

Получена регрессионная модель влияния процентного содержания присадки и нагрузочно-скоростных условий эксплуатации рассматриваемого трибосопряжения на величину износа I, мкм:

$$I(h) = 2{,}1 - 0{,}48P - 0{,}0065N + 3{,}8V + 0{,}066P^2 + 7{,}9 \cdot 10^{-6}N^2 - 10V^2.$$

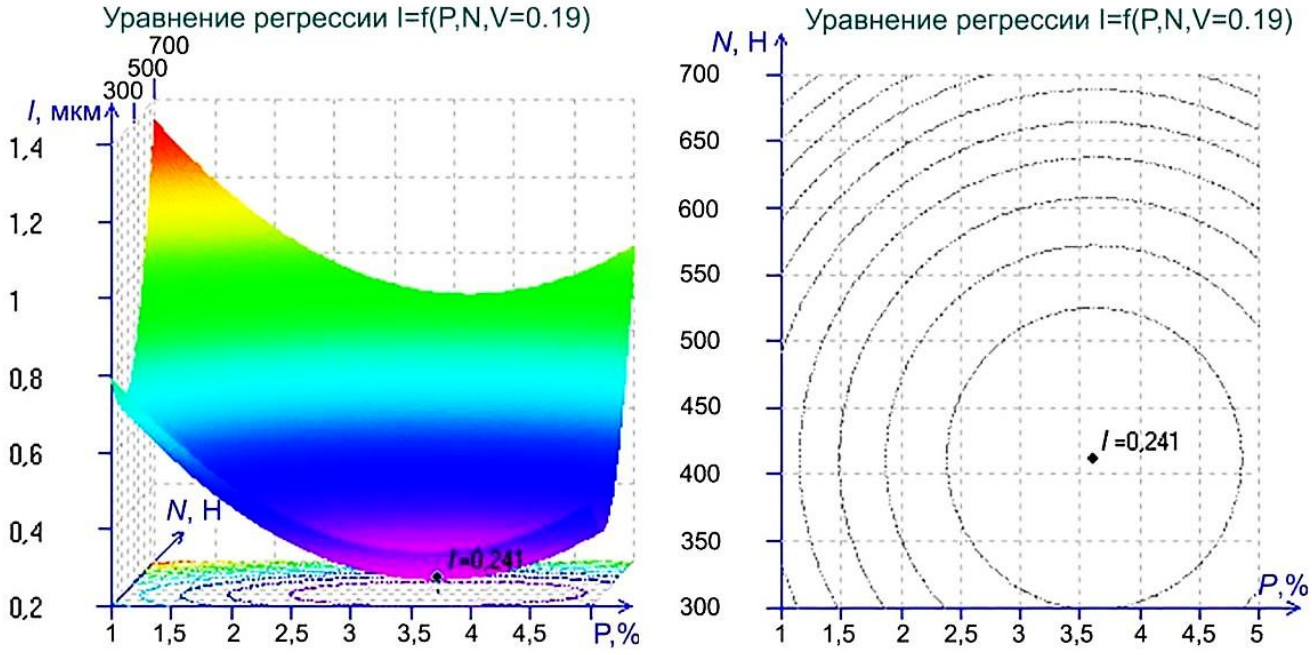


Рисунок 4.10 – Геометрическая интерпретация уравнения регрессии по влиянию процентного содержания Р присадки двойного метафосфата кальция и цинка и нагрузки N на выходной параметр оптимизации (глубина лунки износа) I, мкм, при фиксированной скорости

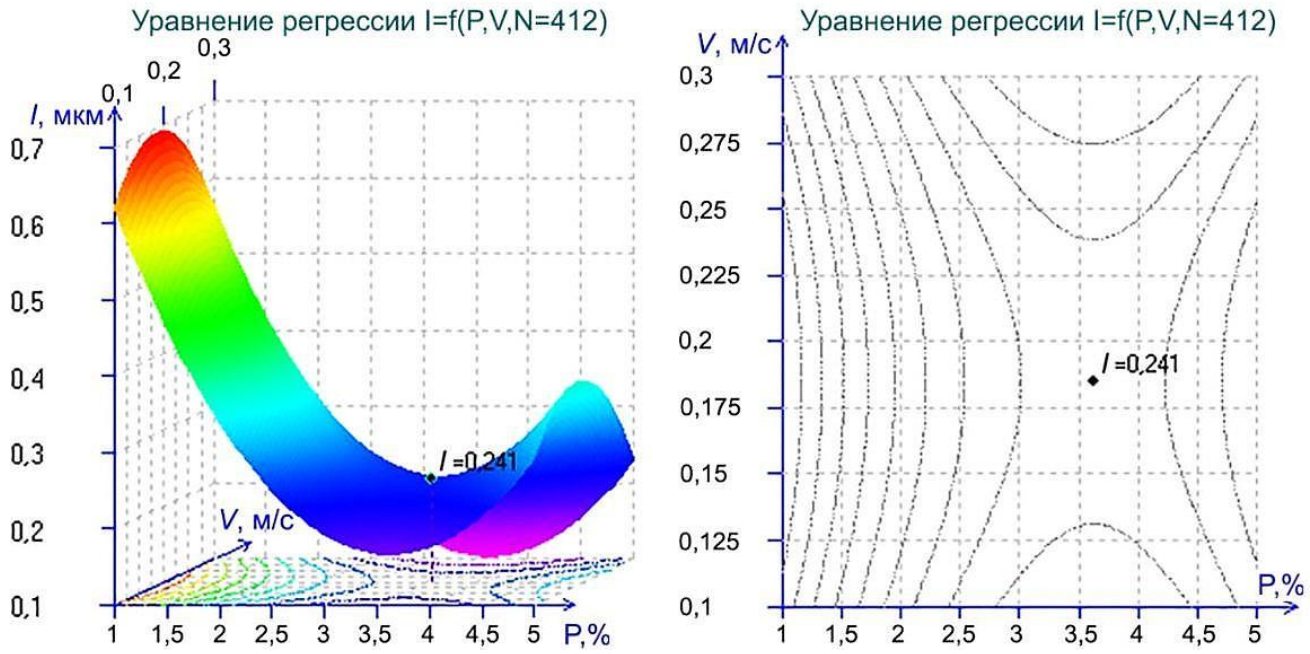


Рисунок 4.11 – Геометрическая интерпретация уравнения регрессии по влиянию процентного содержания Р присадки двойного метафосфата кальция и цинка и скорости относительного скольжения V на выходной параметр оптимизации (глубина лунки износа) I, мкм, при фиксированной нагрузке

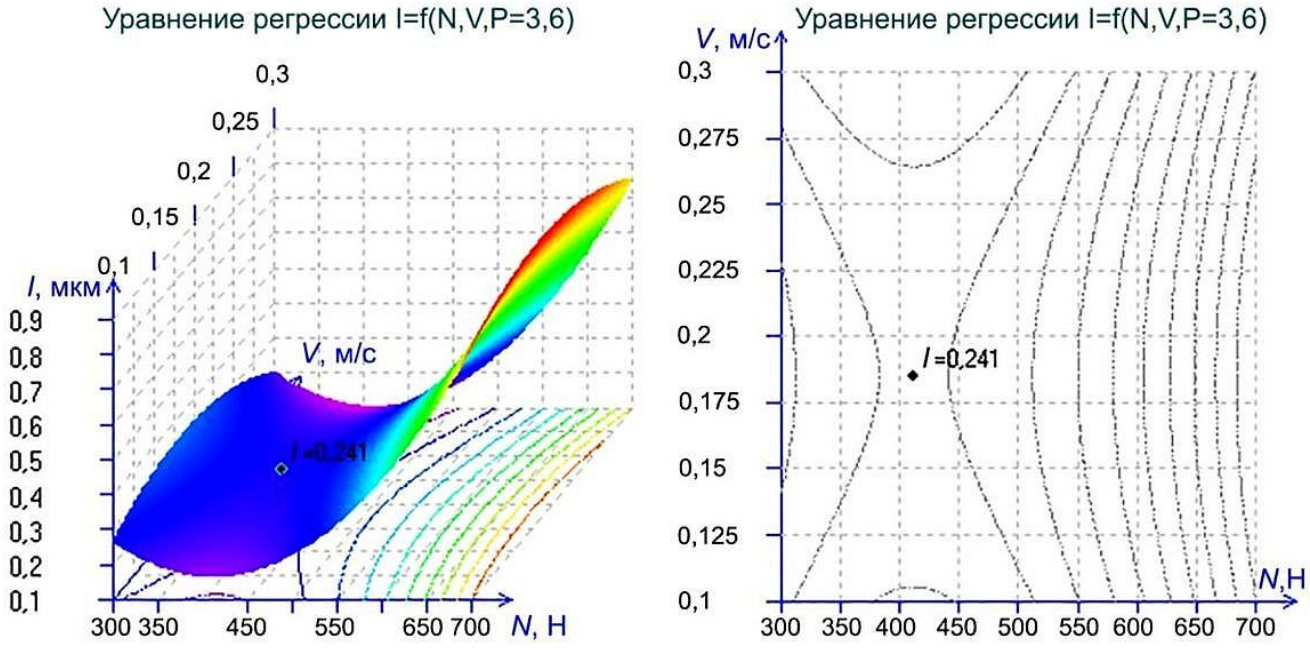


Рисунок 4.12 – Геометрическая интерпретация уравнения регрессии по влиянию нагрузки N и скорости относительного скольжения V на глубину лунки износа I, мкм, при фиксированном процентном содержании присадки двойного метафосфата кальция и цинка Р

На рисунках 4.10 – 4.12 представлена геометрическая интерпретация полученной математической модели влияния процентного содержания присадки и нагрузочно-скоростных условий эксплуатации фрикционной подсистемы «вал – вкладыш» на величину износа I, мкм.

Полученное уравнение регрессии удовлетворяет критерию Фишера: адекватно при уровне значимости 0,05 ($F_р = 1,7$; $F_{кр} = 3,1$).

Анализ регрессионной модели показывает, что:

1) в заданной области эксплуатационных параметров минимальная глубина лунки износа $I = 0,241$ мкм наблюдается при нагрузке $N = 411,8$ Н, максимальной скорости относительного скольжения $V = 0,185$ м/с и процентном содержании присадки двойного метафосфата кальция и цинка $P = 3,6$ % в смазочном материале ПУМА-МР;

2) в заданной области эксплуатационных параметров максимальная глубина лунки износа $I = 1,4$ мкм наблюдается при нагрузке $N = 700$ Н, скорости относительного скольжения $V = 0,185$ м/с и минимальном процентном количестве присадки двойного метафосфата кальция и цинка $P = 1$ % в смазочном материале ПУМА-МР;

3) с увеличением нагрузки N параметр оптимизации I растет, с увеличением скорости относительного скольжения V параметр оптимизации I снижается, с увеличением процентного содержания присадки двойного метафосфата кальция и цинка в смазочном материале ПУМА-МР параметр оптимизации I также снижается;

4) по степени влияния нагрузки и скорости на глубину лунки износа большее значение имеет нагрузка;

Анализ проведенных исследований показывает, что обработка методом электроискрового легирования в индустриальном масле И-40 вольфрамовым электродом FUBAG серии WP, с одной стороны, эффективно предохраняет поверхность стали и электрода от окисления в процессе ЭИЛ, что исключает

коррозию в условиях эксплуатации, с другой стороны, нанесенное покрытие обладает определенным уровнем шероховатости, что создает условия для образования «микрорезервуаров», обеспечивающих сохранение смазочного материала в процессе эксплуатации. При этом использование присадки двойного метафосфата кальция и цинка в смазочном материале ПУМА-МР обеспечивает образование вторичных структур, прочно удерживающихся на поверхности трения. Последний факт подтверждается проведенным исследованием влияния эксплуатационных режимов на износостойкость покрытия, нанесенного методом ЭИЛ в случае использования смазочного материала ПУМА-МР без присадки. Как показали наши исследования, содержание в пластичных смазочных материалах разработанной присадки двойных метафосфатов с концентрацией 3,6 % позволило значительно увеличить ресурс работы исследуемой фрикционной системы [164].

4.3 Оценка эффективности разработанных присадок – двойных метафосфатов – к пластичным смазочным материалам в условиях динамических нагрузок

В связи с тем, что большинство узлов трения подвижного состава работают в условиях динамического нагружения, в том числе и рассматриваемая нами трибосистема – «пятник – подпятник» грузового вагона, нами была разработана, изготовлена и запатентована машина трения, позволяющая проводить сравнительные испытания на износостойкость в широком диапазоне изменения амплитуды и частоты нагрузки [165, 166].

4.3.1 Многофункциональная машина трения для динамических испытаний и результаты изменения трибологических параметров при осевом и радиальном нагружении

Многофункциональная машина трения (ММТ), предназначена для трибологических испытаний полимерных, металлических и различных композитных материалов. Конструктивные особенности ММТ позволяют реализовывать путем нескольких вариантов монтажной сборки следующий набор функциональных решений: исследование трибоэлектрических явлений – измерение значений величины ЭДС, генерируемой при трении различных материалов в разных режимах; измерение момента и коэффициента трения и трения покоя. Испытания осуществляются в режимах: стационарном – при постоянной нагрузке и скорости, а также в динамическом – при изменении частоты и амплитуды нагрузочного режима.

ММТ представляет собой сборную конструкцию (рисунок 4.13), включающую в себя: защитный экран *1*; стол-станину *6* со стальной плитой *2*, на которой установлен электрический привод – асинхронный двигатель с регулируемой частотой вращения от 1 до 920 об/мин с помощью частотного преобразователя *4*, установленного в блоке управления *3*. Монтажная сборка основных элементов конструкции может осуществляться в нескольких конфигурациях в зависимости от режима трибологических испытаний.

Экран *1* применяется для защиты трибологического узла от внешних воздействий – рекомендуется использовать его в основном при исследовании трибоэлектрических явлений, в том числе и от влияния электромагнитных полей, в связи с чем конструкцией ММТ предусмотрено, что асинхронный двигатель не размещается внутри защитного экрана.

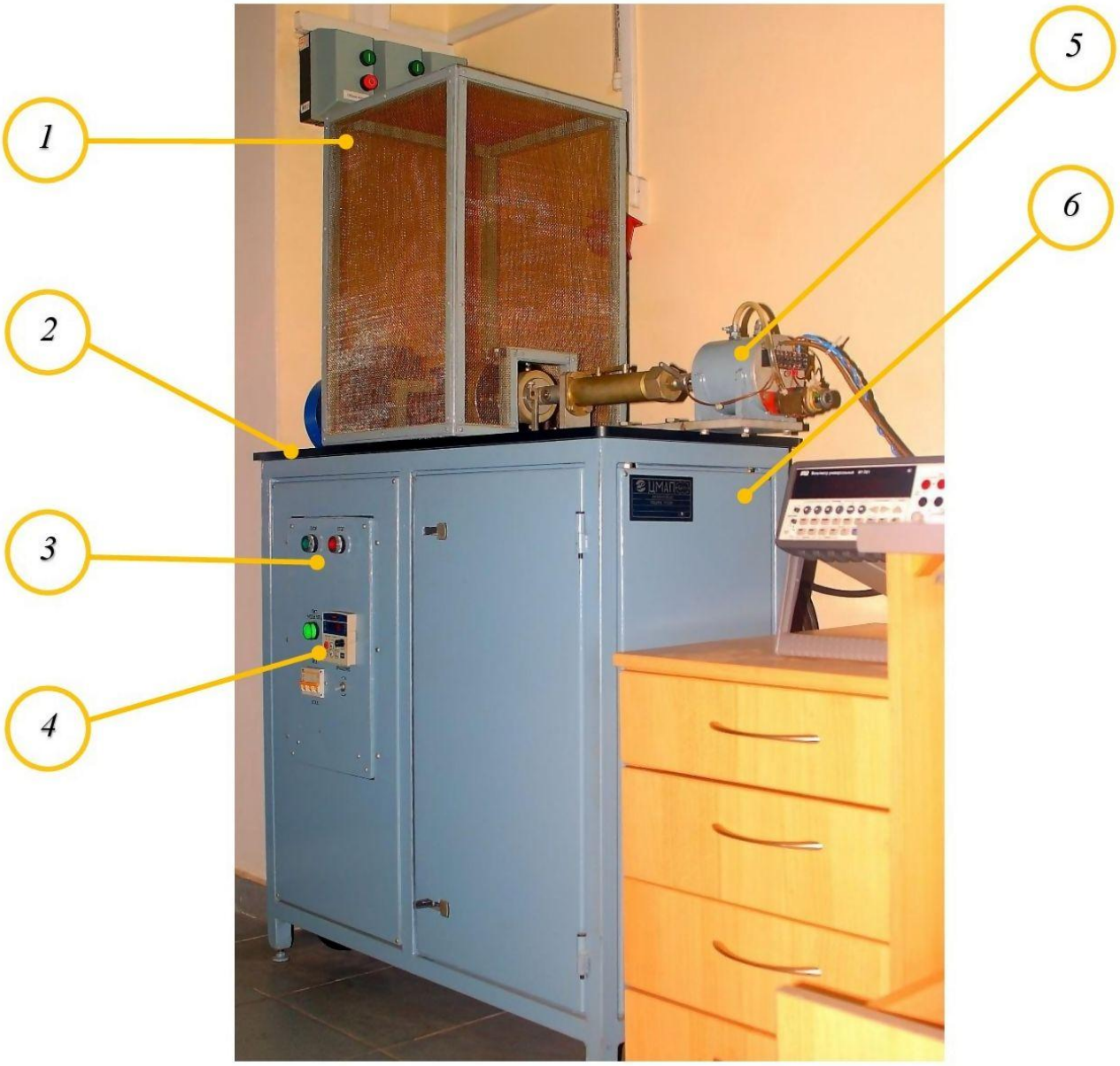


Рисунок 4.13 – Общий вид машины трения

На рисунке 4.14 внутри защитной зоны экрана можно наблюдать размещенный там трибологический узел с датчиками силы, там же находятся несущая конструкция с опорными подшипниками и соединительная муфта для передачи вращения от вала электродвигателя. Между наружной и внутренней частью располагается основной подшипник качения, что и обеспечивает подвижность наружной части. Во внутренней неподвижной части *3* находится дополнительный подшипник с вращающимся валом.

Также на рисунке 4.14 представлен принцип измерения момента трения, который основан на взаимодействии (сцеплении) контактных поверхностей ролика *5* и испытываемого образца *4*, что создает крутящий момент и в узле трения – происходит поворот наружной части *1*, с которой закреплен кронштейн, удерживающий образец *4*, с последующей передачей нагрузки на датчики силы *2*.

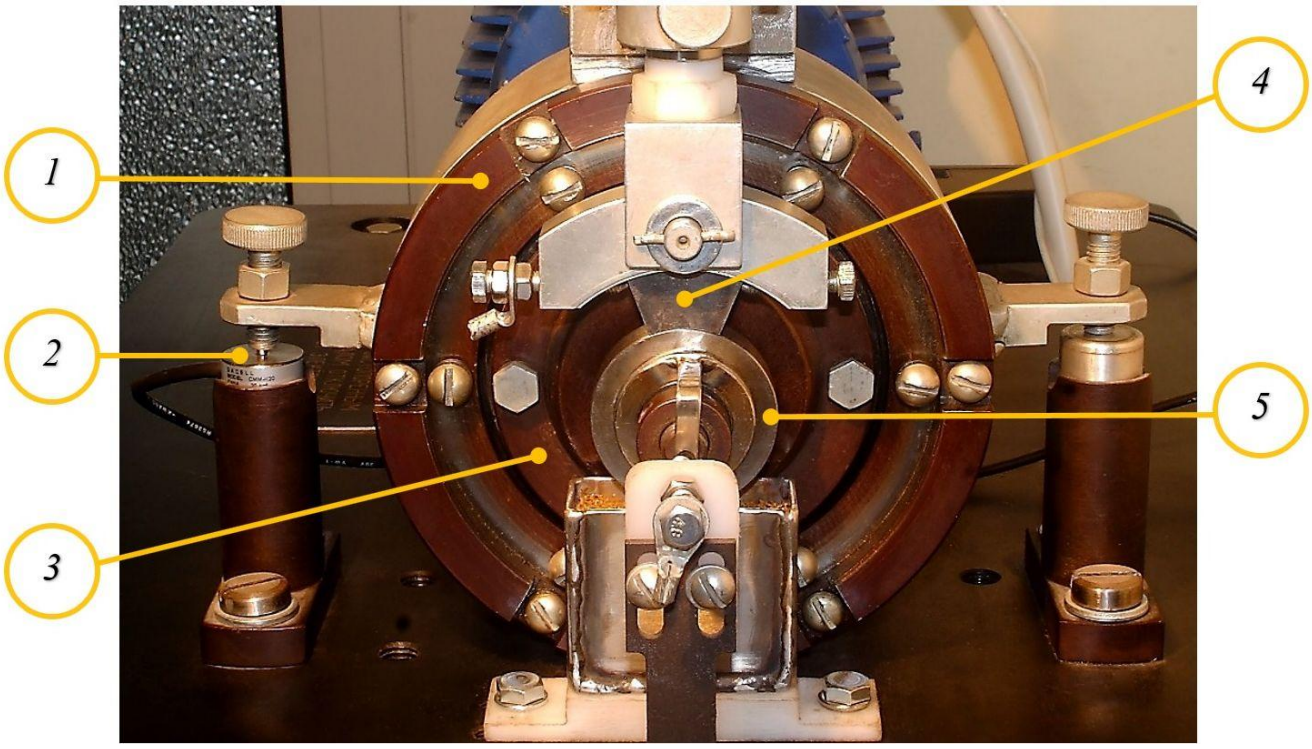


Рисунок 4.14 – Трибологический узел:
1 – наружная поворотная часть; *2* – датчик силы; *3* – внутренняя неподвижная часть; *4* – испытываемый образец (контртело); *5* – вращающийся ролик

Предлагаемая конструкция машины трения предусматривает два основных варианта исполнения – при радиальной и торцевой нагрузке. Трибологический узел на рисунке 4.14 – вариант при радиальной нагрузке, включающий в себя элемент (рисунок 4.15, *а*), представляет стандартную схему трибоконтакта, широко применяемую в машинах трения ИИ5018 и в СМТ-1. Для данной ММТ изготовлены дополнительные конструктивные элементы: образец цилиндрической формы (рисунок 4.15, *б*), который при контакте торцевой

(плоской) стороной с поверхностью катания ролика диаметром 40 мм обеспечивает высокие удельные давления в зоне контакта с вращающейся поверхностью ролика; а также элемент (рисунок 4.15, *в*), разработанный для схемы испытаний при осевой (торцевой) нагрузке, образец кольцевой формы с плоской поверхностью и вращающийся ролик при трибоконтакте образуют эквидистантные поверхности.

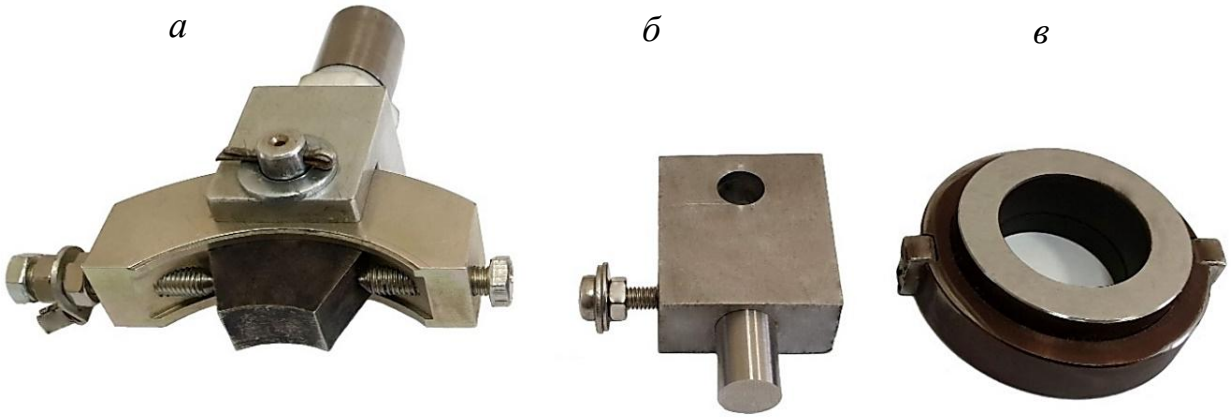


Рисунок 4.15 – Элементы фрикционного узла и пары трения для трибоконтактов с роликом из стали 45:
а – образец, взаимозаменяемый с образцом ИИ5018; *б* – цилиндрический образец; *в* – образец торцевого контакта

Следует отметить, что все три элемента могут использоваться для реализации испытаний в стационарном и динамическом режимах, а также для моделирования работы некоторых узлов трения, например «колесо – колодка» (см. рисунок 4.15, *а*), «пятник – подпятник» грузового вагона (см. рисунок 4.15, *в*).

Вспомогательным элементом конструкции, с помощью которого поддерживается режим при динамических испытаниях, является электромагнитное устройство (см. рисунок 4.13, п. *5*, рисунок 4.16) – индуктивная катушка-соленоид для создания механических колебаний с различным диапазоном частот.

Фрикционный узел трения при радиальной нагрузке представлен кинематической схемой на рисунке 4.16 и при осевой нагрузке – на рисунке 4.18, а реальные исполнения такой трибосистемы по схемам испытаний при радиальной и осевой нагрузке представлены в Приложении 2.

Фрикционный узел трения при радиальной нагрузке (см. рисунок 4.16) представляет собой контакт поверхности катания ролика *4* и образца *3*, воспринимающего динамическую нагрузку от индуктивной катушки *1* через шток 2. Трибологические испытания могут проводиться в нескольких режимах:

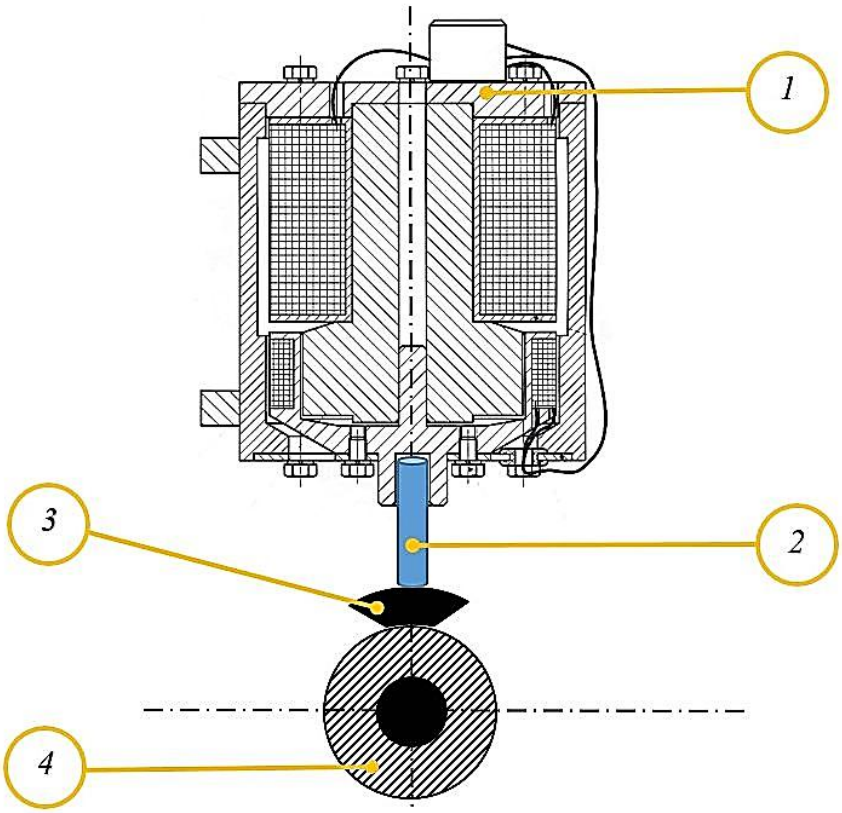


Рисунок 4.16 – Схема испытаний при радиальной нагрузке:
1 – катушка индуктивности в сборе; *2* – шток, передающий динамическую нагрузку; *3* – испытываемый образец; *4* – ролик из стали 45

– режим сухого трения – применяется для полимеров, когда испытываемый образец изготавливается из полимерного материала или из различных композитных материалов, с последующим измерением величины трибоЭДС (Приложение 3);

В задачу нашей диссертационной работы не входило исследование электрических явлений при трении. Однако проведенное нами предварительное изучение этих процессов при трении с наличием смазочных материалов показало не только возможности разработанной многофункциональной машины трения, но и перспективность таких исследований [167];

– режим трения в среде смазки – конструкцией предусмотрена подача смазочного материала в зону трибоконтакта (рисунок 4.17), в основном применяется для металлических образцов.

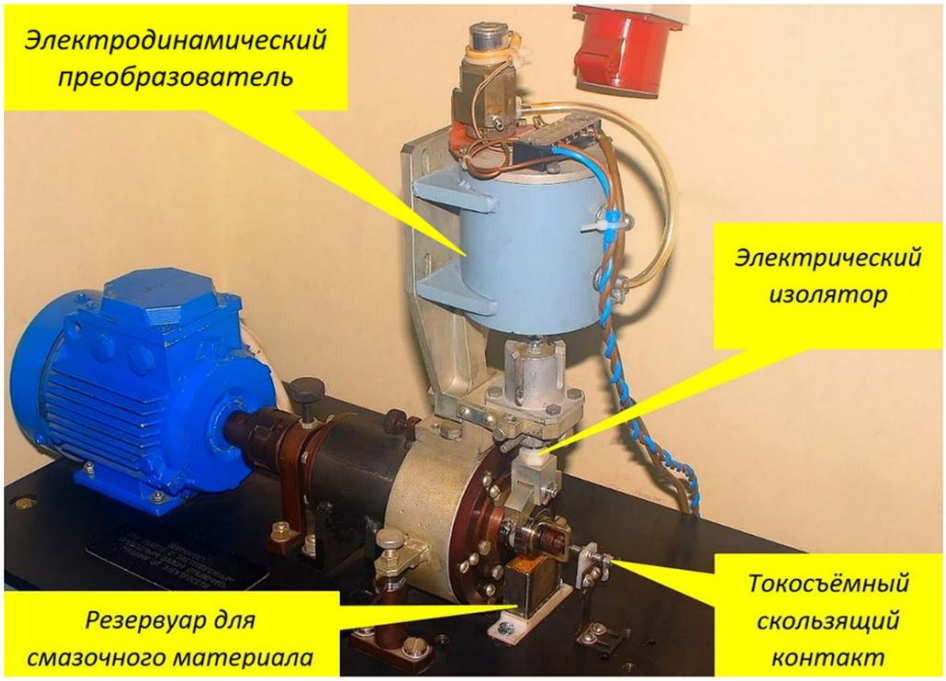


Рисунок 4.17 – Резервуар для подачи смазочного материала на поверхность катания ролика и электрически изолированные элементы

Для обеспечения зоны трибоконтакта смазкой применяется «фитильное» смачивание – в резервуар, изготовленный из нержавеющей стали, помещается пористый материал, пропитанный смазочным материалом, в качестве которого применяются масла и пластичные смазки.

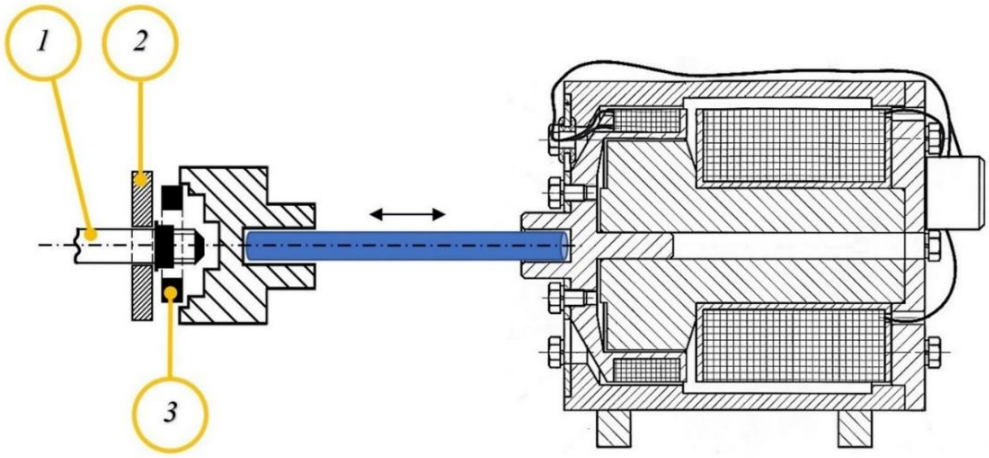


Рисунок 4.18 – Схема испытаний при осевой нагрузке:
1 – вал вращения; *2* – ролик из стали 45; *3* – испытываемый образец

Динамические испытания, как при радиальной, так и при осевой нагрузке, осуществлялись с помощью разработанного нами электродинамического преобразователя (ЭДП), схема которого представлена на рисунках 4.16, 4.17 и 4.18, а схема управления – на рисунке 4.19. Основными элементами здесь являются обмотки медного провода (катушка управления и катушка подмагничивания) и подвижного стального сердечника для создания электродинамической вибрации.

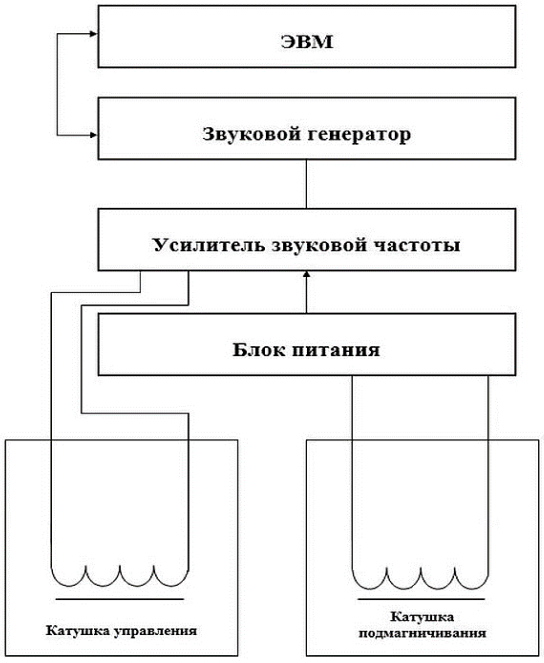


Рисунок 4.19 – Схема подключения и управления ЭДП

Согласно схеме на рисунке 4.19 диапазон частоты и амплитуды динамических колебаний задается с помощью программного обеспечения (ПО) под управлением операционной системы Windows или Linux (рисунок 4.20).

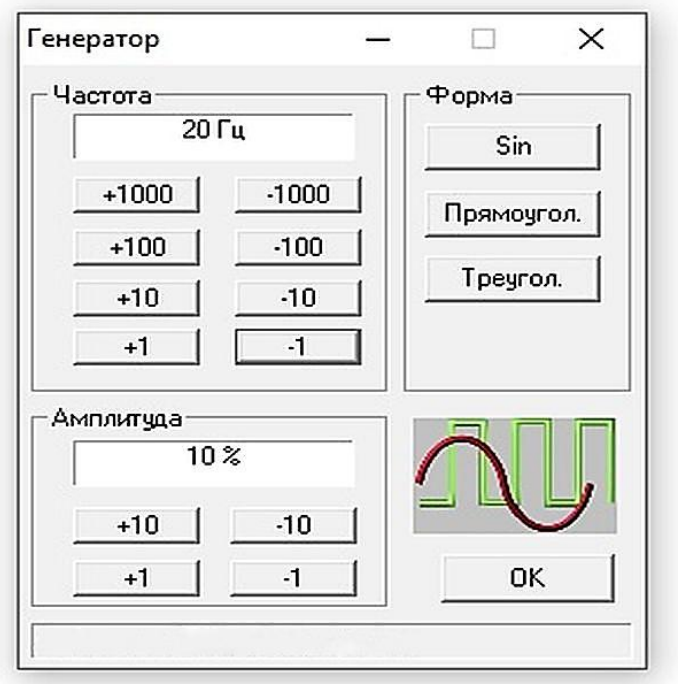


Рисунок 4.20 – ПО – генератор звуковых колебаний

Заданные с помощью ПО значения из персонального компьютера (ЭВМ) поступают на усилитель сигнала мощностью 500 Вт (для данной ММТ применяется модель Sony XM-N502), далее выходной сигнал из усилителя подается на катушку управления, а катушка подмагничивания питается постоянным током с выходными параметрами 12 В и 25 А, что и обеспечивает функционирование ЭДП с требуемым диапазоном колебаний.

Следует отметить, что необходимым условием для проведения исследований трибоэлектрических явлений как при стационарных так и при динамических режимах является электрическая изоляция от основной массы конструкции ММТ элементов, непосредственно участвующих в трибологическом процессе: пара трения «ролик – образец» (см. рисунок 4.15, *а*) – устройство, передающее нагрузку на образец, изготовлено с электрическим изолятором;

токосъемный скользящий контакт; металлическая емкость для подачи смазочного материала (см. рисунок 4.17); вращающийся ролик, изолированный от вала вращения; нагрузочное устройство при торцевой (осевой) схеме испытаний аналогично выполнено с электроизоляцией.

Одна из целей наших исследований заключалась в том, чтобы оценить влияние пластичных смазочных материалов с неорганическими присадками и электроискровым модифицированием поверхности трибоконтакта на процесс изнашивания в условиях динамических испытаний. При этом режимы испытаний были максимально сопоставимы с параметрами работы реального узла трения «пятник – подпятник» подвижного состава, что позволяет определить эффективность применения комбинированного метода модифицирования поверхности трения в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

В действительности большинство трибологических исследований проводилось на моделях при движении трибосистемы в направлении скольжения с постоянной нагрузкой. В нашем случае сила давления изменяется периодически, что существенно отражается на поведении узла трения.

Испытания эффективной работоспособности разработанных присадок – двойных метафосфатов – проводились при частоте и амплитуде нагрузки, как уже отмечалось, приближенных к работе реального трибосопряжения «пятник – подпятник». Для реализации сопоставимости проводимых исследований с параметрами реального трибосопряжения «пятник – подпятник» на созданной установке (см. рисунок 4.13) и по разработанной методике частота механических колебаний нагрузки менялась в диапазоне 0…60 Гц с помощью электромагнитного устройства (индуктивная катушка – соленоид), передающего нагрузку через шток на испытываемый образец. Диапазон частоты и амплитуды (до 3 мм) был выбран из анализа литературного обзора [165, 166].

Динамические нагрузки с регулируемой амплитудой и частотой могли создаваться как в направлении вдоль оси вала (см. рисунок 4.18), так и в

перпендикулярном ему направлении – вдоль радиальной нагрузки (см. рисунок 4.16). Для сравнения полученных результатов интенсивности изнашивания при динамическом нагружении нами были выбраны параметры скорости и нагрузки при значениях: V = 0,185 м/с, N = 411,8 Н, соответствующие оптимальным результатам износа, полученного при статическом режиме (см. п. 4.2) и оптимальном содержании присадки двойных метафосфатов 3,6 % в пластичной смазке. Сравнительные результаты при осевой схеме испытаний (показанной на рисунке 4.18) представлены на рисунке 4.21

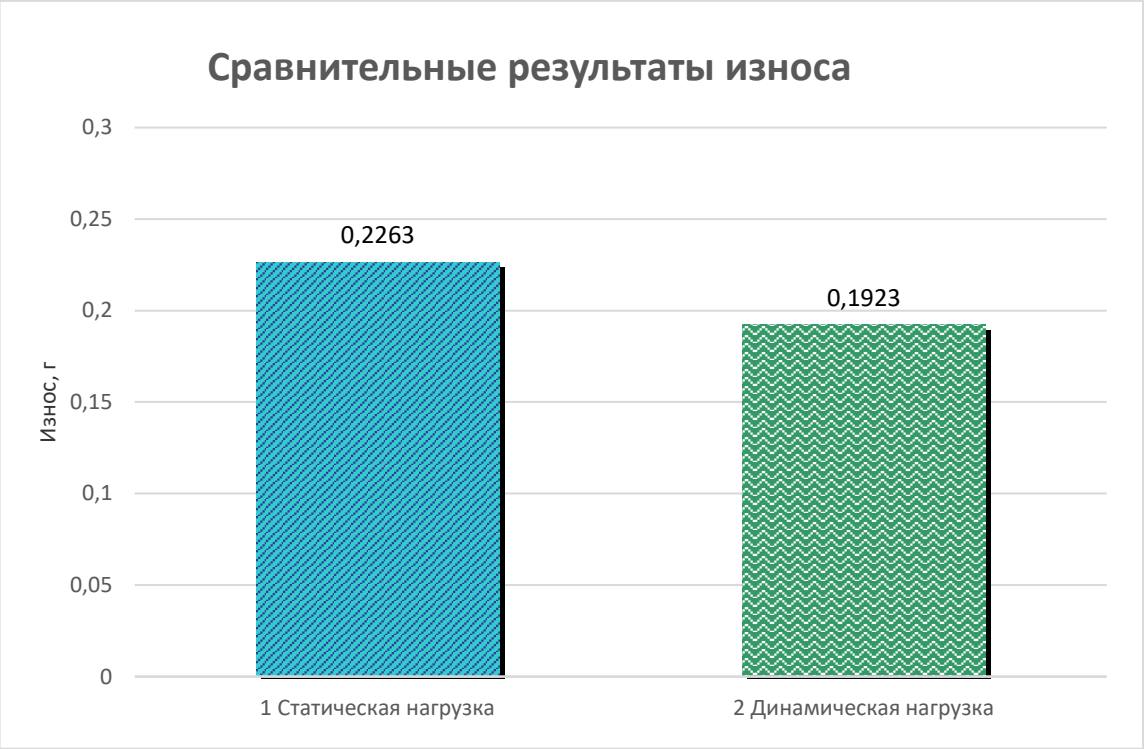


Рисунок 4.21 – Сравнительные результаты износа при статическом (1) и при динамическом (2) режиме: скорость V = 0,185 м/с, нагрузка N = 411,8 Н, процентное содержание присадки P = 3,6 %

Получено, что при колебаниях по схеме испытаний при радиальной нагрузке (см. рисунок 4.16) интенсивность изнашивания пары «ролик – частичный подшипник» незначительно уменьшается (на 7 %) по сравнению со статической нагрузкой. При колебаниях вдоль оси вала уменьшается на 15 % по

сравнению со статической нагрузкой. Это происходит из-за того, что фактическая площадь контакта трибосистемы работает в режиме дискретного контактирования.

4.4 Выводы по главе 4

1 Разработанные присадки двойных метафосфатов обладают более высокой энергией связи с железом по сравнению с широко распространенными в качестве присадок жирными кислотами, что обусловливает наибольшую способность линейной молекулы к структурной приспосабливаемости к поверхности трибоконтакта с последующим образованием вторичных структур – пленок переноса.

2 Нанесенное покрытие с определенным уровнем шероховатости выполняет функцию «микрорезервуаров» для сохранения смазочного материала в зоне трибоконтакта, а оптимизация содержания присадки к смазочному материалу методом планирования эксперимента позволяет увеличивать ресурс фрикционной системы.

3 Установлено влияние динамических нагрузок на интенсивность изнашивания I пары трения «ролик – частичный подшипник». При радиальном динамическом воздействии при скорости $V = 0{,}185$ м/с, нагрузки $N = 411{,}8$ Н и процентном содержании присадки двойных метафосфатов $P = 3{,}6$ % в пластичной смазке, при частоте воздействия $\omega = 60$ Гц интенсивность изнашивания I уменьшается на 7 %, а при осевом динамическом воздействии I уменьшается на 15 % по сравнению со статической нагрузкой. Это происходит из-за того, что трибоконтакт при динамической нагрузке является дискретным.

Глава 5. ВНЕДРЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЕТАФОСФАТНЫМИ ПРИСАДКАМИ В ПЯТНИКОВОМ УЗЛЕ ГРУЗОВОГО ВАГОНА

Как было отмечено в первой главе диссертации, конструкция трибосопряжения «пятник – подпятник» грузового вагона обеспечивает взаимодействие кузова *4* и тележки с надрессорной балкой *3* (рисунок 5.1).

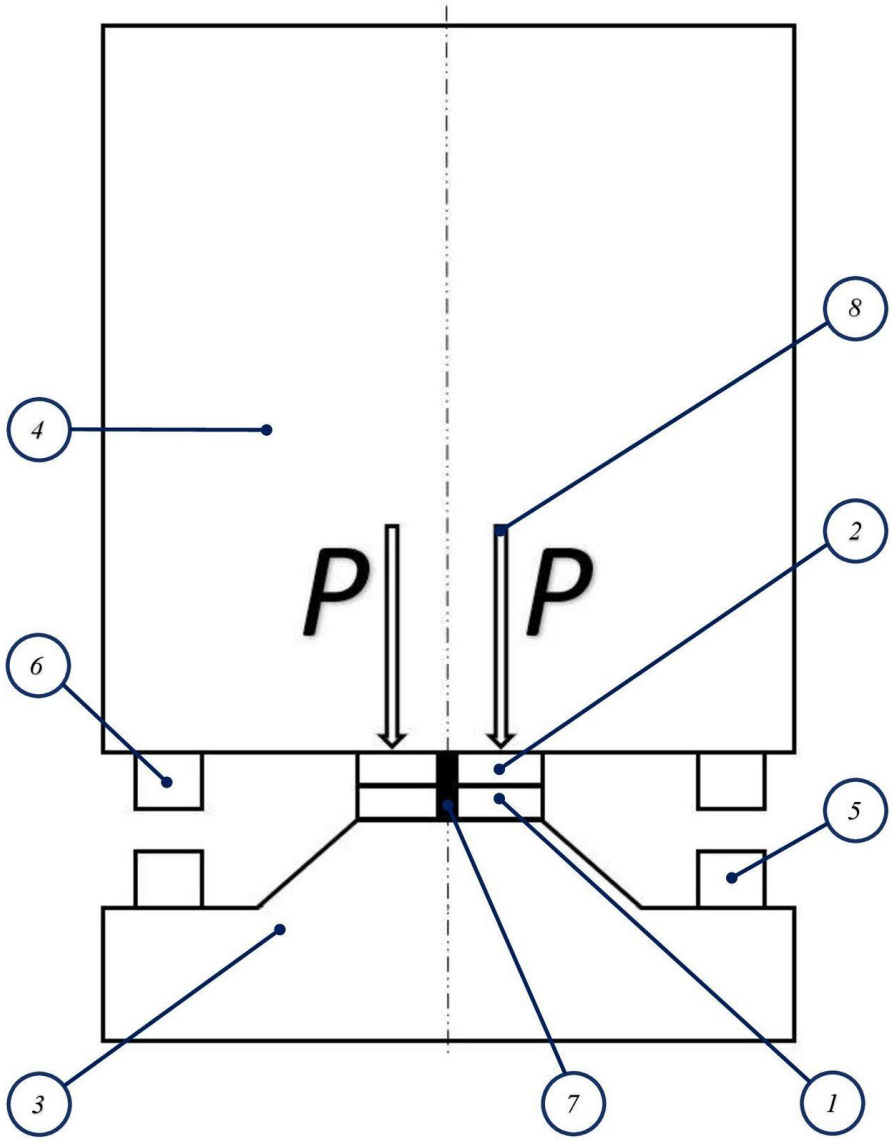
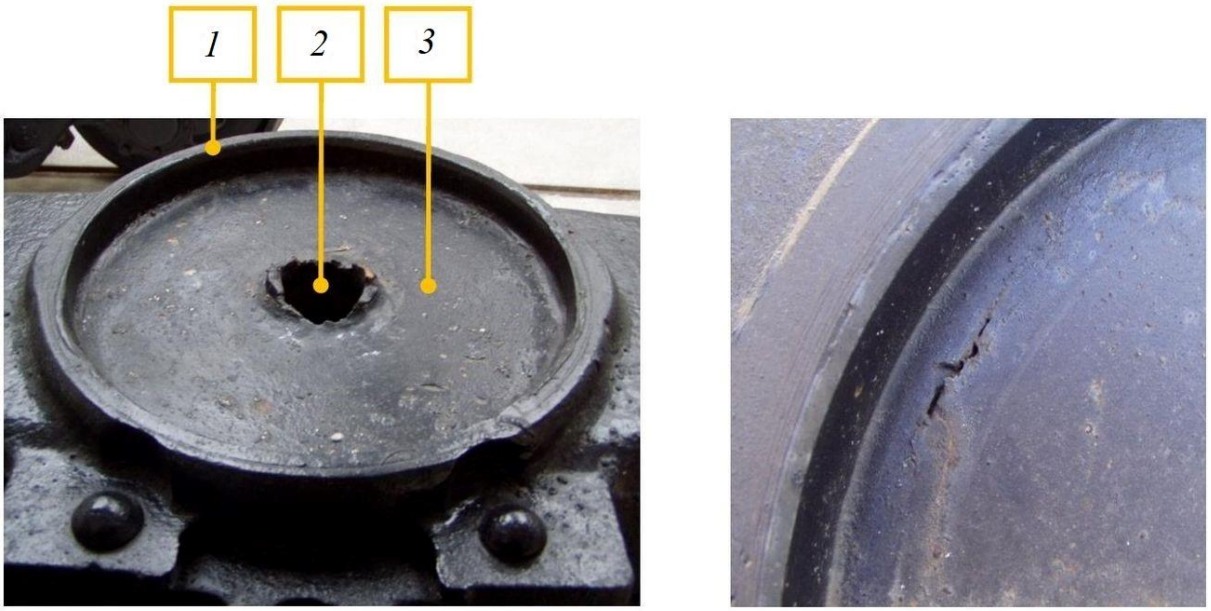


Рисунок 5.1 – Схема передачи тяги и опирания пятника вагона на подпятник тележки

Шкворень *7* (см. рисунок 5.1) служит для обеспечения безопасности при движении вагона и для передачи тяги от тележки к кузову. Конструктивно шкворень проходит через пятник *2* и подпятник *1* сквозь отверстие в их центральной части. Для устойчивости вагона служат скользуны кузова *6* и скользун надрессорной балки *5*. Пятник имеет опорную (горизонтальную) и упорную (вертикальную) поверхности, которые обеспечивают передачу усилий от кузова *8* с нагрузкой *P* на тележку. Подпятник *1* является единой составной частью надрессорной балки *3*.

В результате больших нагрузок на пятниковый узел, а также гашения колебаний вагона силами трения в этом трибосопряжении наблюдается усталостный износ буртика и опорной поверхности подпятника, а также отверстия для шкворня (рисунок 5.2) и опорной и боковой поверхности пятника (рисунок 5.3).



а *б*

Рисунок 5.2 – Износ подпятника:

а и *б* – общий вид и части подпятника; *1* – буртик подпятника;

2 – отверстие для шкворня; *3* – опорная поверхность подпятника

а *б*

Рисунок 5.3 – Износ пятника:

а – общий вид; *б* – износ поверхности пятника

Важнейшей проблемой для эксплуатации подвижного состава является то, что надежность и износостойкость сопряжения «пятник – подпятник» влияет на процесс взаимодействия другого ответственного сопряжения «колесо – рельс». Особенно наглядно это проявляется при движении вагона на криволинейном участке, где повороту тележки относительно вагона препятствуют силы трения в трибосопряжении «пятник – подпятник», что приводит к износу гребня колеса и головки рельса. Кроме этого, растут энергозатраты на преодоление сил трения. Для повышения износостойкости и снижения энергозатрат разработаны различные методы [2, 4, 168–173]. Среди них в первую очередь можно выделить применение смазки и упрочнение опорных и боковых поверхностей пятникового узла. Исследования в данной области [6, 174–184] показали, что рассматриваемый узел «пятник – подпятник» подвержен перемещениям и работает в условиях больших динамических нагрузок, что приводит к выдавливанию смазочного материала, а в конечном итоге – к увеличению износа пятника и подпятника. Проведенные нами теоретические и экспериментальные исследования по комбинированной модификации поверхности трения – электроискровому легированию и использованию пластичных смазочных материалов с метафосфатными присадками показали, что это не только повышает адгезионные

свойства смазки, но и проявляет противоизносные, противозадирные и антикоррозионные свойства [185–187].

В первую очередь нами проведены стендовые испытания, максимально приближенные к реальным эксплуатационным [188].

5.1 Стендовые испытания материалов узла «пятник – подпятник» грузового вагона подвижного состава

Трибологические испытания смазочных материалов ПУМА и БУКСОЛ, относящихся к виду пластичных смазочных материалов, без присадки и с введенной разработанной присадкой $NiZn[(PO_3)_4]_\infty$ в качестве эксперимента проводились на модельном стенде (рисунок 5.4) – сварной конструкции *4* включающей в себя надрессорную балку *3* и узел трения «пятник – подпятник» *2* от грузового железнодорожного вагона, оснащенный гидравлическим приводом *1*, совершающим возвратно-поступательные движения штока гидроцилиндра для перемещения пятникового узла относительно надрессорной балки, что позволяет имитировать работу вагона в процессе эксплуатации.

Рисунок 5.4 – Общий вид модельного стенда:

1 – гидравлический привод; *2* – «пятник – подпятник»; *3* – надрессорная балка; *4* – сварная конструкция; *5* – гидравлическая станция

В надрессорную балку грузового вагона помещался диск из стали 30ХГСА, на который предварительно наносились пластичные смазочные материалы ПУМА-МЛ и БУКСОЛ отдельно для каждого вида испытаний (рисунок 5.5), далее на поверхность диска устанавливался пятниковый узел грузового вагона (рисунок 5.6).

а *б*

Рисунок 5.5 – Диски с нанесенными пластичными смазочными материалами перед началом испытания:
а – ПУМА-МЛ; *б* – БУКСОЛ

а *б*

Рисунок 5.6 – Надрессорная балка и пятниковый узел грузового вагона:
а – без диска; *б* – с диском

Нагрузка на испытуемое трибологическое сопряжение осуществлялась с помощью специального гидравлического домкрата и составляла 100 и 300 кН,

отдельно для каждого вида стендовых испытаний. Частота возвратно-вращательных перемещений пятникового узла постоянна и составляет 11 циклов в минуту (согласно инструкции стенда).

Перед началом и по окончании каждого испытания толщина диска (прокладки) измерялась с помощью микрометра в контрольных точках по приведенной ниже схеме (рисунок 5.7).

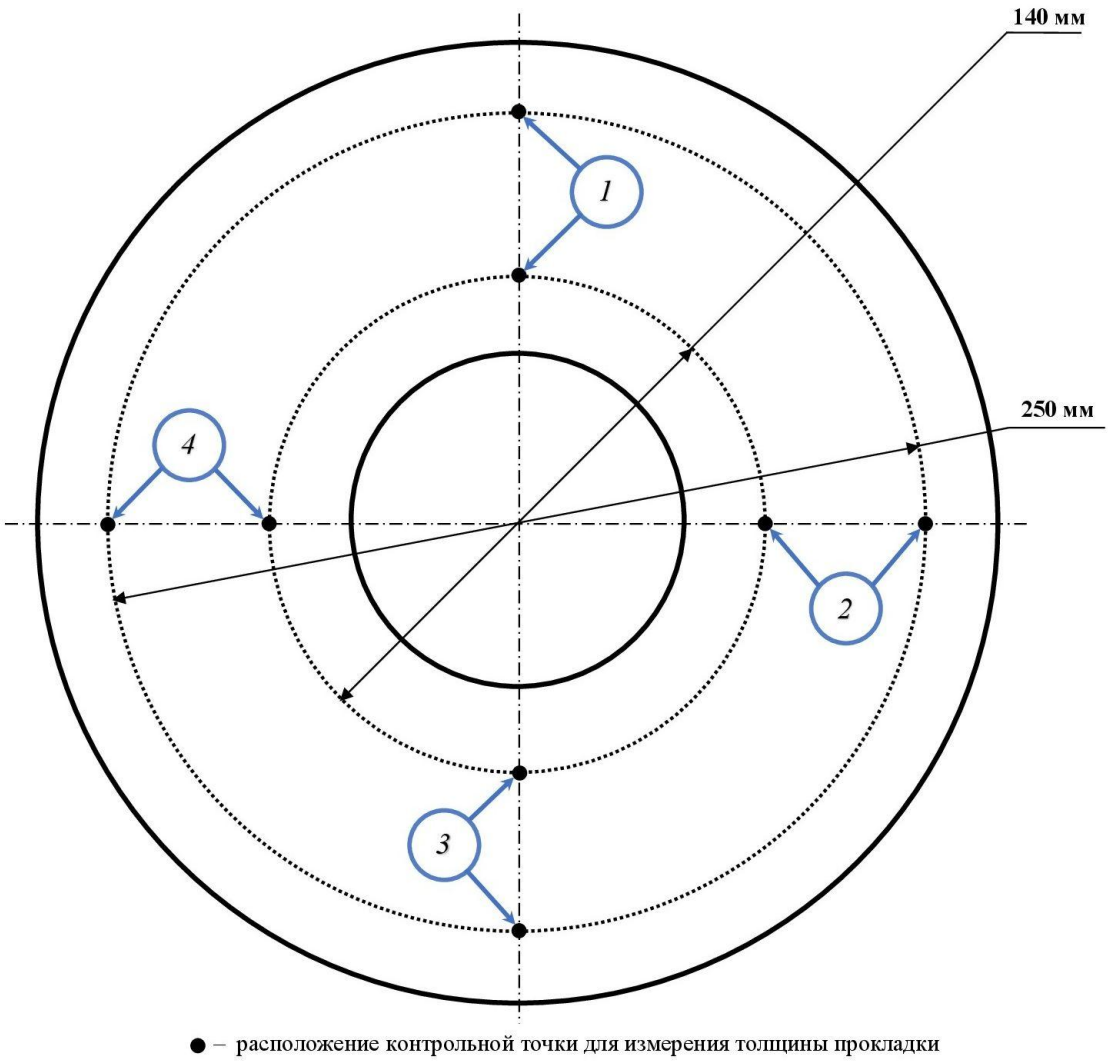


Рисунок 5.7 – Схема расположения контрольных точек толщины прокладки

Испытания проводились по 10-часовому непрерывному циклу. Измерения величины износа диска проводились в контрольных точках по наружной (250 мм) и внутренней (140 мм) части диска согласно номерам (№ 1, 2, 3, 4) в двух взаимно перпендикулярных направлениях в плоскости действия силы нагрузки.

Ниже представлены гистограммы (диаграммы) результатов трибологических испытаний при нагрузке 100 кН.

Результаты испытаний смазочной композиции ПУМА-МЛ измерение в контрольных точках по наружной стороне, приведены на рисунке 5.8.

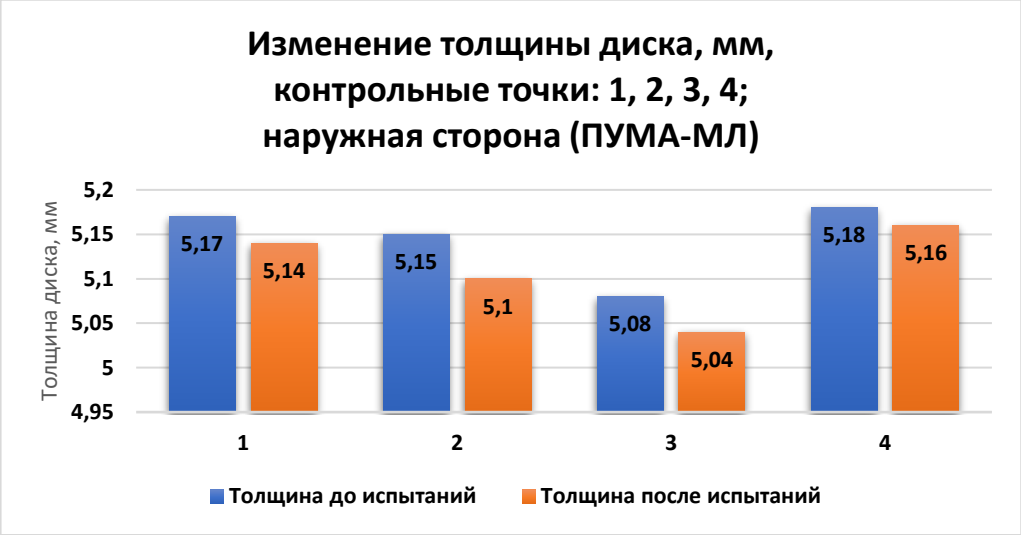


Рисунок 5.8 – Диаграмма изменения толщины диска до и после испытаний – смазка ПУМА-МЛ

Результаты испытаний смазочной композиции ПУМА-МЛ с присадкой $NiZn[(PO_3)_4]_\infty$, измерение в контрольных точках по наружной стороне, приведены на рисунке 5.9.

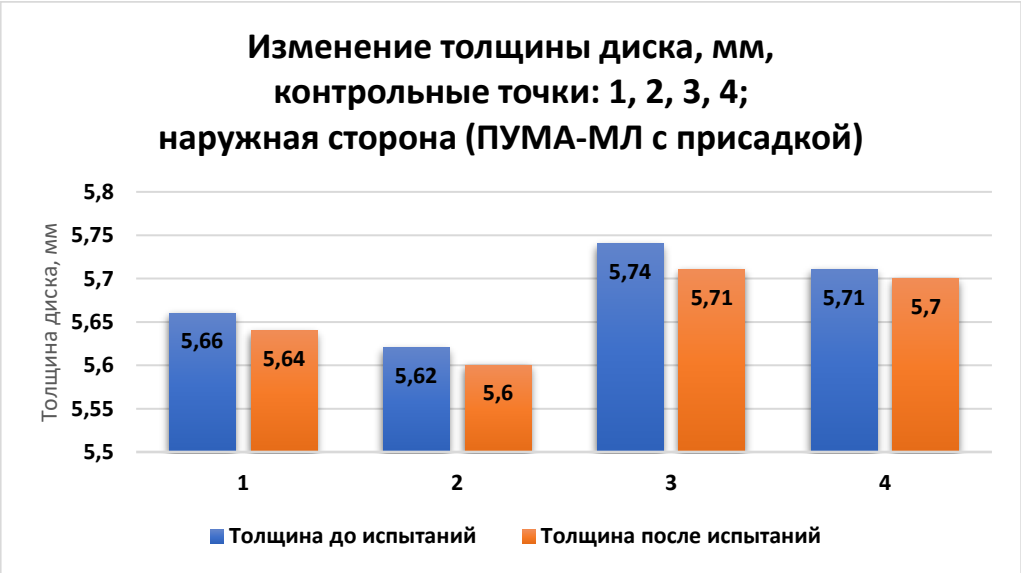


Рисунок 5.9 – Диаграмма изменения толщины диска до и после испытаний – смазка ПУМА-МЛ с присадкой

Результаты испытаний смазочной композиции ПУМА-МЛ, измерение в контрольных точках по внутренней стороне, приведены на рисунке 5.10.

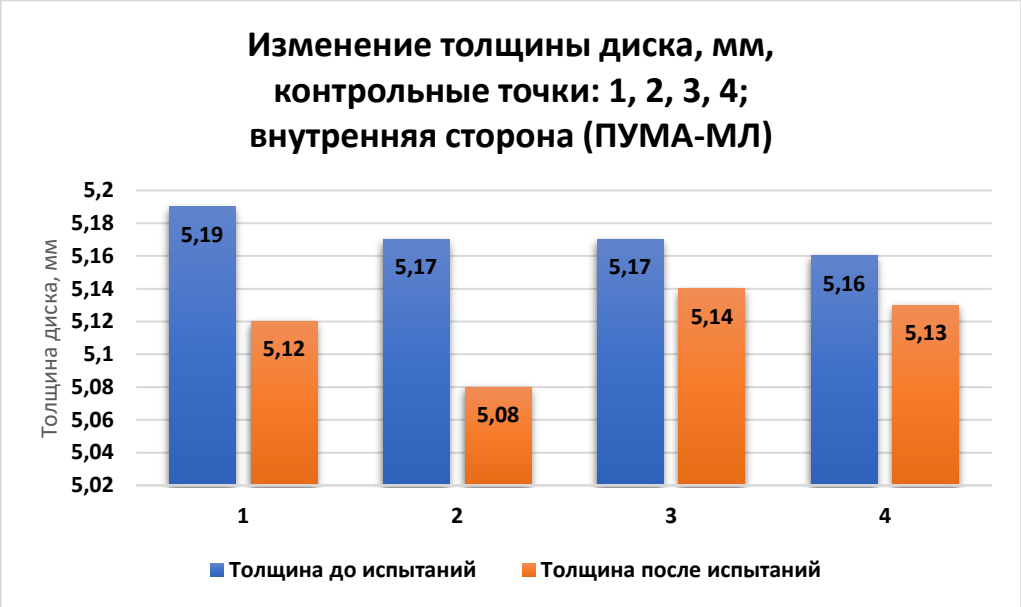


Рисунок 5.10 – Диаграмма изменения толщины диска до и после испытаний – смазка ПУМА-МЛ

Результаты испытаний смазочной композиции ПУМА-МЛ с присадкой $NiZn[(PO_3)_4]_\infty$, измерение в контрольных точках по внутренней стороне, приведены на рисунке 5.11.

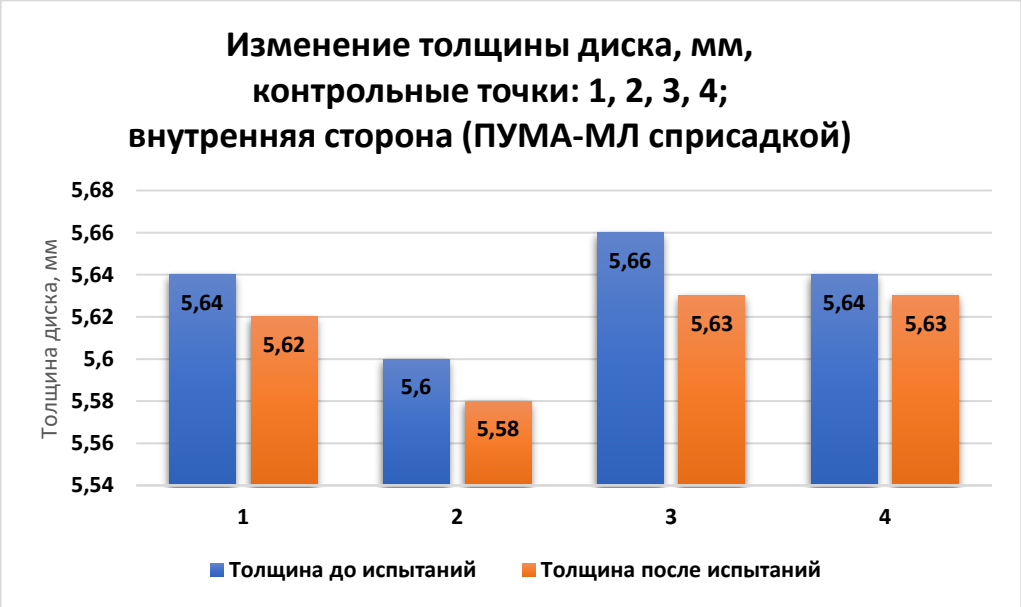


Рисунок 5.11 – Диаграмма изменения толщины диска до и после испытаний – смазка ПУМА-МЛ с присадкой

Результаты испытаний смазочной композиции БУКСОЛ, измерение в контрольных точках по наружной стороне, приведены на рисунке 5.12.

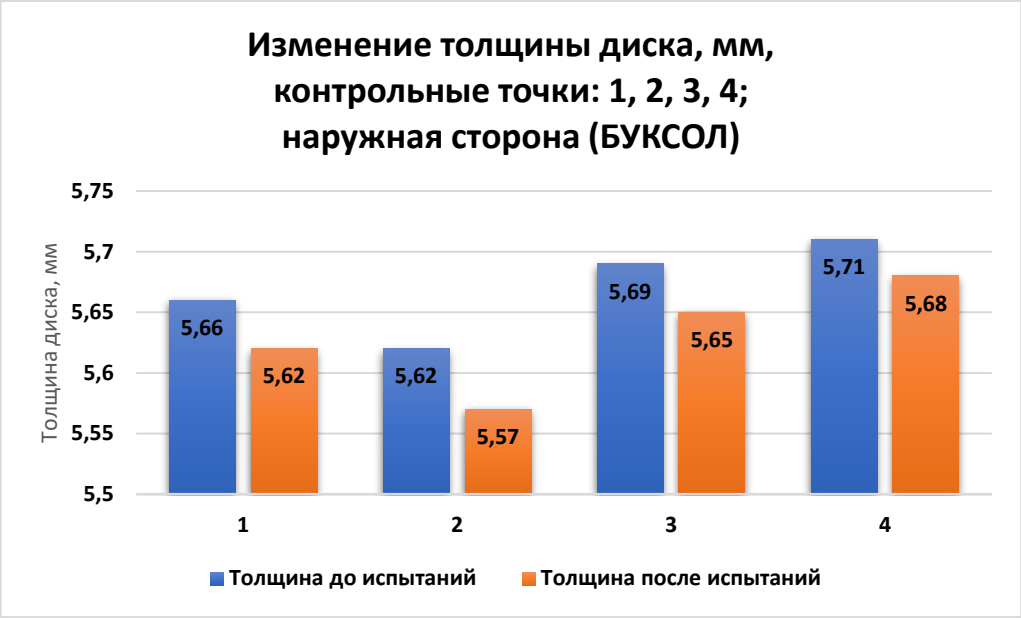


Рисунок 5.12 – Диаграмма изменения толщины диска до и после испытаний – смазка БУКСОЛ

Результаты испытаний смазочной композиции БУКСОЛ с присадкой $NiZn[(PO_3)_4]_\infty$, измерение в контрольных точках по наружной стороне, приведены на рисунке 5.13.

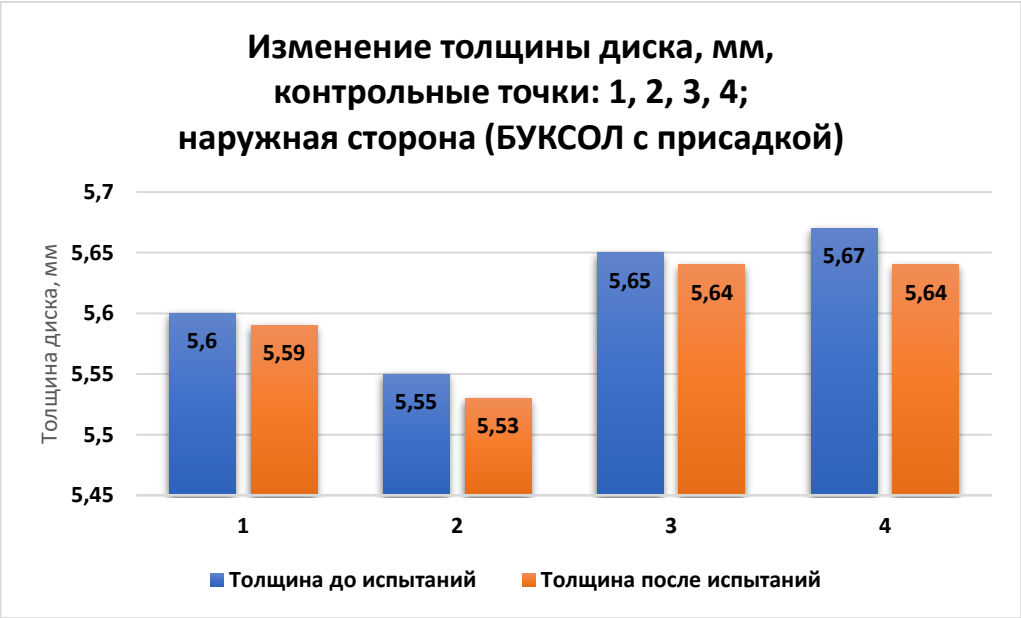


Рисунок 5.13 – Диаграмма изменения толщины диска до и после испытаний – смазка БУКСОЛ с присадкой

Результаты испытаний смазочной композиции БУКСОЛ, измерение в контрольных точках по внутренней стороне, приведены на рисунке 5.14.

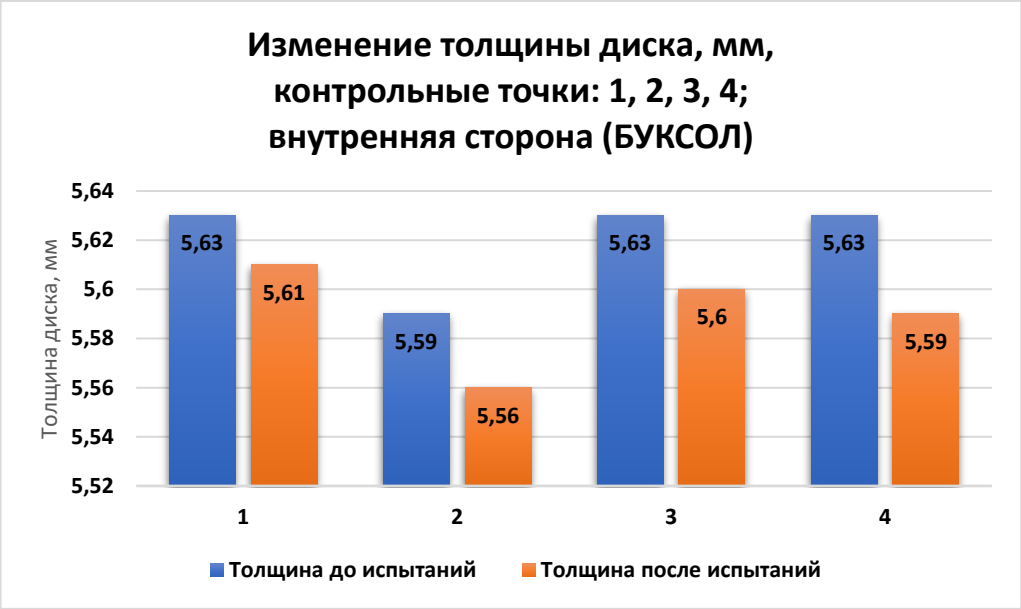


Рисунок 5.14 – Диаграмма изменения толщины диска до и после испытаний – смазка БУКСОЛ

Результаты испытаний смазочной композиции БУКСОЛ с присадкой $NiZn[(PO_3)_4]_\infty$, измерение в контрольных точках по внутренней стороне, приведены на рисунке 5.15.

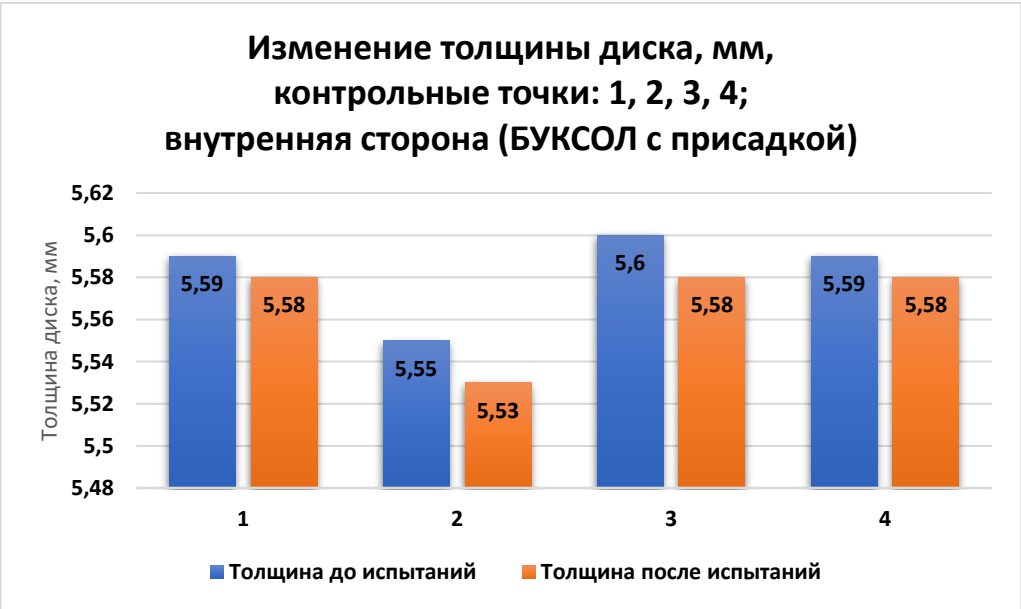


Рисунок 5.15 – Диаграмма изменения толщины диска до и после испытаний – смазка БУКСОЛ с присадкой

По итогам проведенных испытаний ниже представлены разности значений изменения толщины дисков перед испытаниями (исходные заводские размеры нового диска) и после испытаний, со смазочными материалами без присадки и с присадкой (рисунки 5.16–5.19).

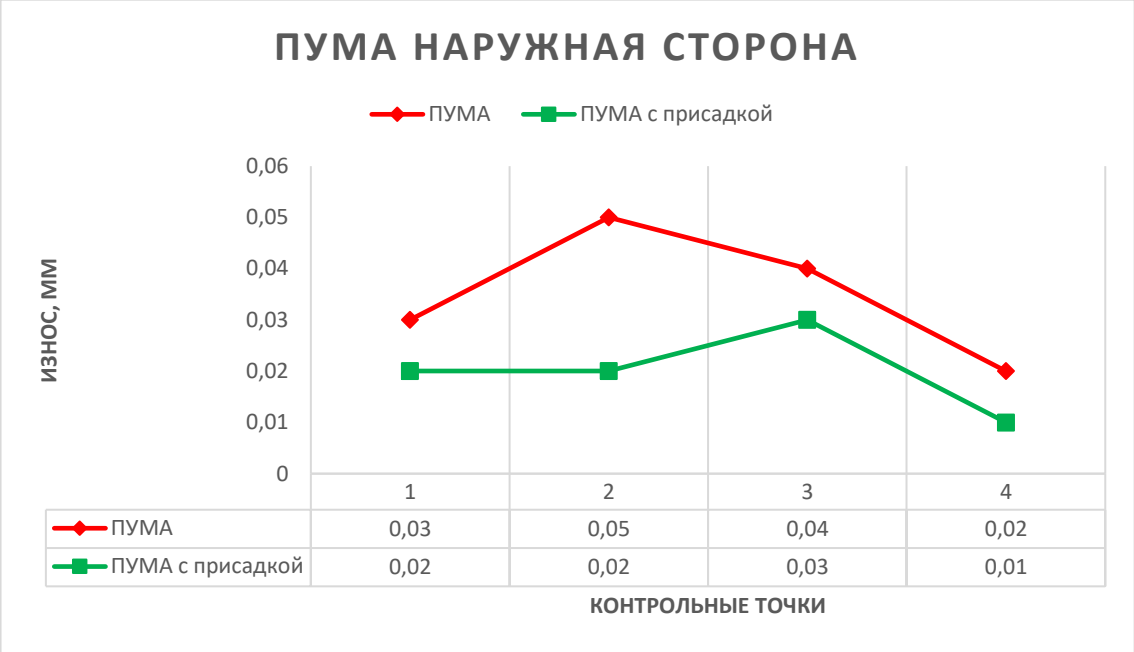


Рисунок 5.16 – Износ со смазкой ПУМА и ПУМА с присадкой, наружная сторона диска

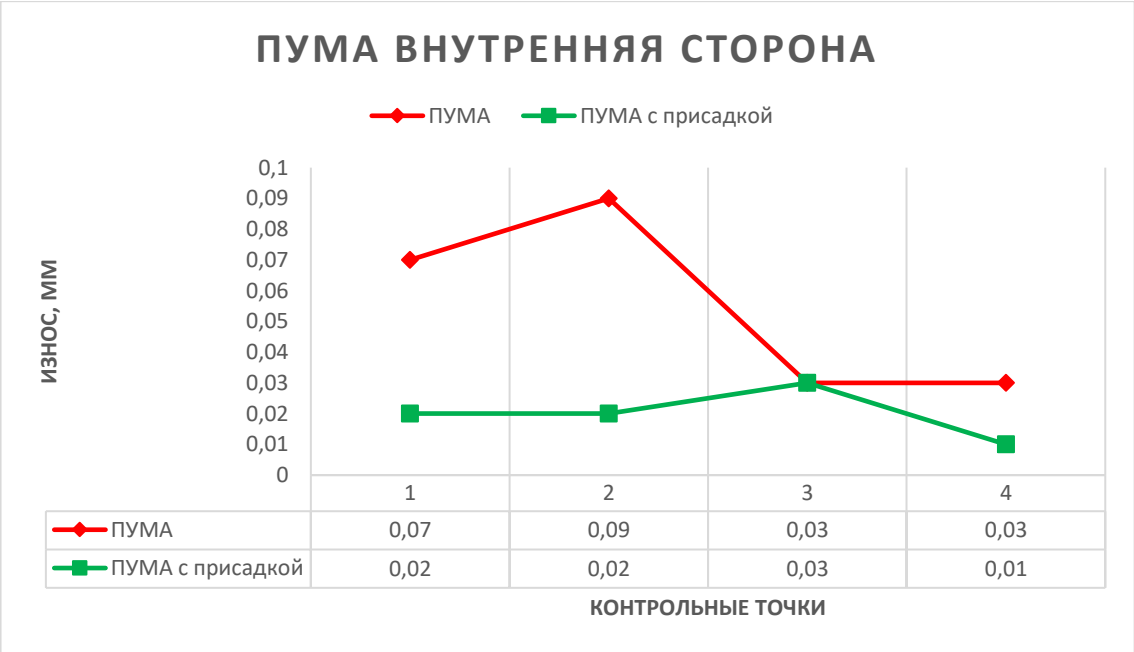


Рисунок 5.17 – Износ со смазкой ПУМА и ПУМА с присадкой, внутренняя сторона диска

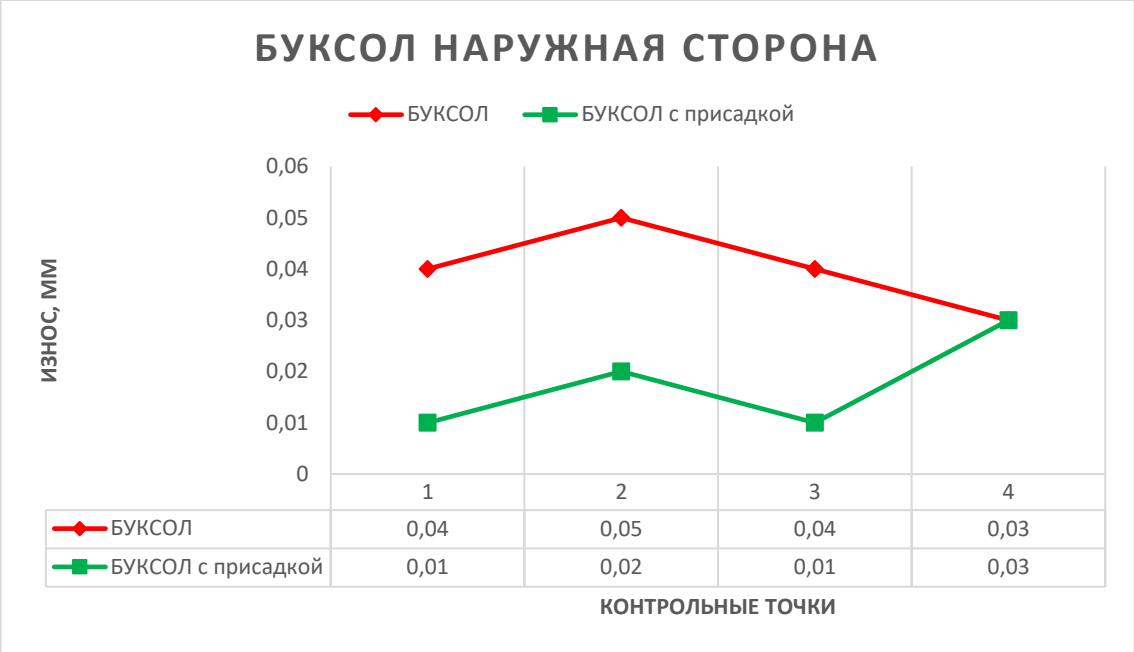


Рисунок 5.18 – Износ со смазкой БУКСОЛ и БУКСОЛ с присадкой, наружная сторона диска

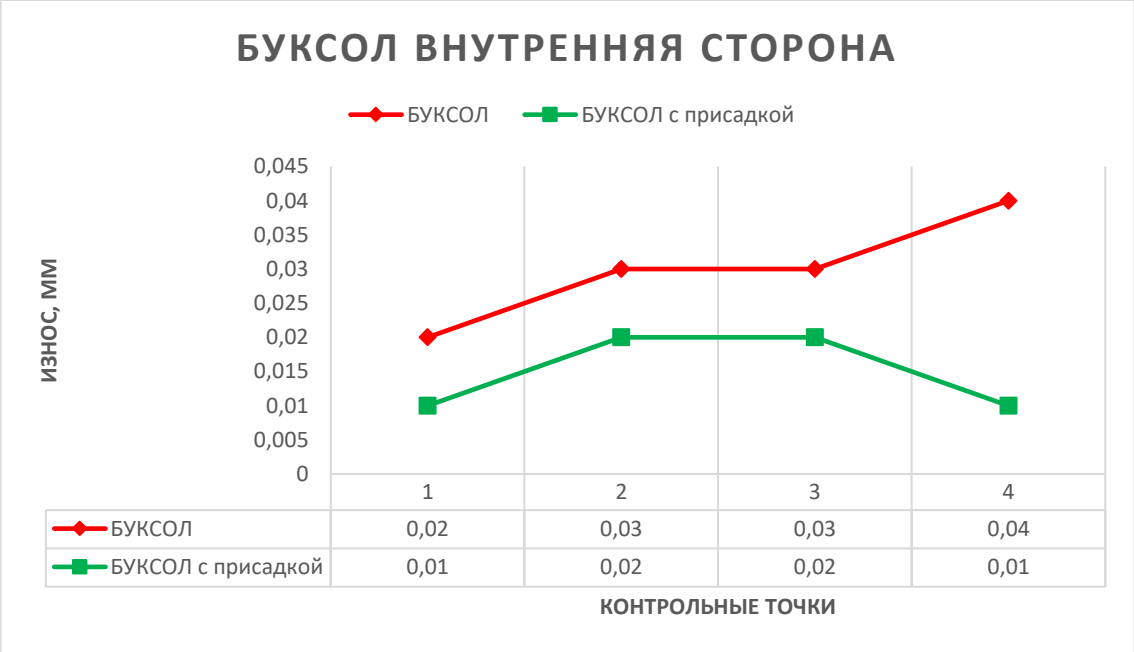


Рисунок 5.19 – Износ со смазкой БУКСОЛ и БУКСОЛ с присадкой, внутренняя сторона диска

Разница значений толщины диска в контрольных точках до испытаний объясняется изначальной неравномерностью поверхностей новых дисков, поставляемых заводом-изготовителем. Приведенные результаты показывают, что

при испытании смазочных композиций с присадкой $NiZn[(PO_3)_4]_\infty$ диск изнашивается меньше по сравнению с применением базового смазочного материала. Следует отметить, что со смазкой БУКСОЛ при увеличении нагрузки до 300 кН не происходит заметного роста значений износа, что можно объяснить образованием защитной пленки на поверхности трения диска и пятника в процессе трения.

Аналогичные испытания проводились для пластичной смазочной композиции БУКСОЛ при нагрузке 300 кН и в результате подтвердили эффективность применения разработанной присадки к пластичным смазочным материалам для повышения износостойкости тяжелонагруженных трибосистем (Приложение 4).

5.2 Эксплуатационные испытания материалов узла «пятник – подпятник» грузового вагона подвижного состава

Проведенные нами лабораторные и стендовые испытания разработанной технологии комбинированного модифицирования трибосопряжений пятникового узла с помощью электроискрового легирования и использования пластичных смазочных материалов с метафосфатными присадками показали положительные результаты и послужили основанием для проведения эксплуатационных испытаний. Эксплуатационные испытания проводились в вагоноремонтном депо «Татарская» Западно-Сибирской железной дороги.

При этом следует отметить, что предлагаемая технология обработки поверхности подпятника не нарушает технологию восстановления надрессорных балок грузовых вагонов, утвержденную ОАО «РЖД», в том числе и технологический процесс ремонта на завершающей его стадии, перед отправкой восстановленной надрессорной балки на участок сборки тележки вагона.

Для реализации предлагаемой технологии нами была разработана портативная установка (рисунок 5.20) с вращающимся электродом, позволяющая

проводить модифицирование упорной внутренней поверхности наружного бурта подпятника в полевых условиях.

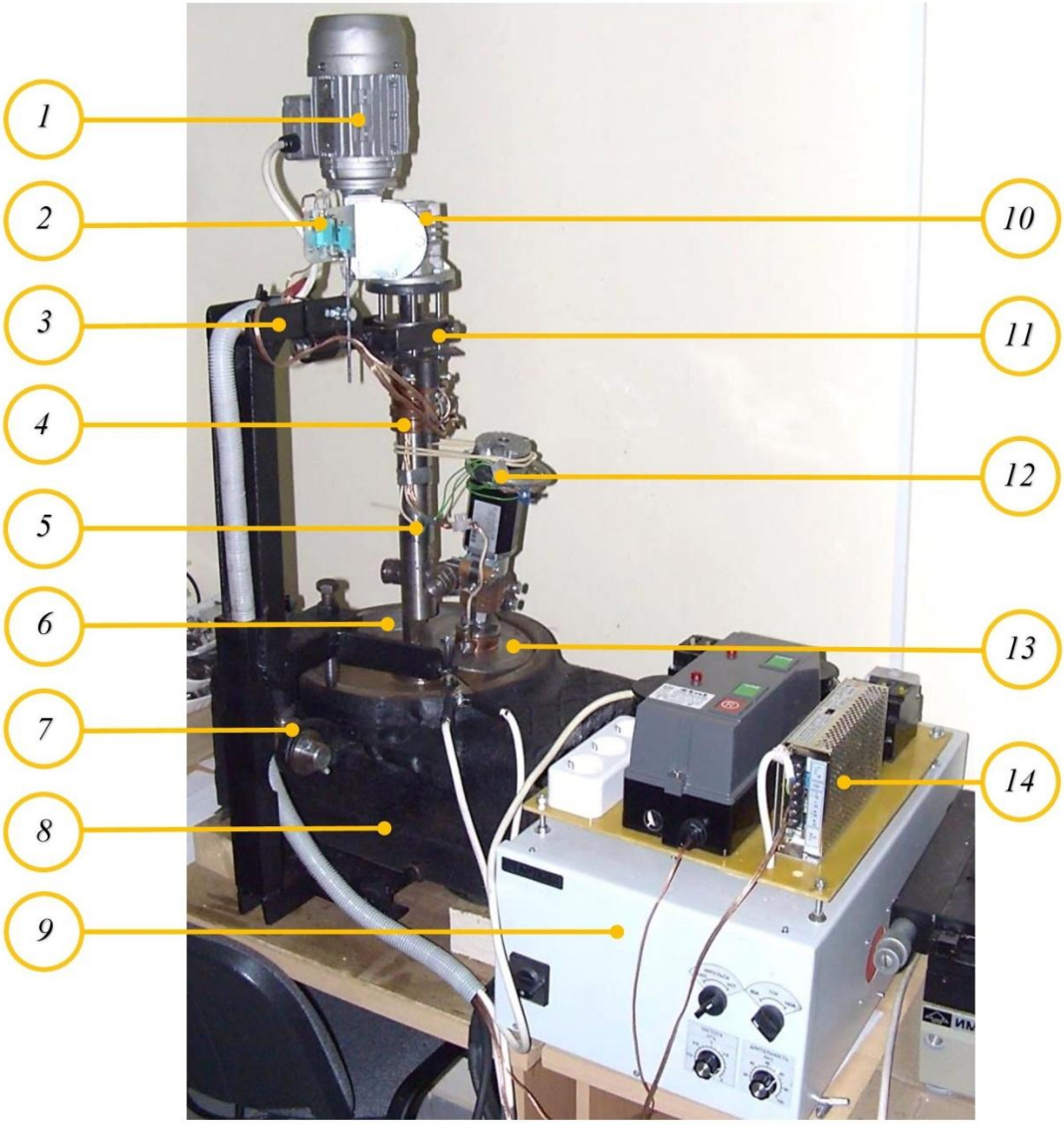


Рисунок 5.20 – Общий вид установки:

1 – электродвигатель привода центрального вала; *2* – блок концевых выключателей; *3* – несущая консоль; *4* – медные кольца щеточных контактов; *5* – центральный вал; *6* – обрабатываемая поверхность; *7* – проушина; *8* – надрессорная балка; *9* – генератор технологических импульсов тока АРТА-5Л; *10* – редуктор; *11*– вилка крепления центрального вала; *12* – электродвигатель привода вращающегося электрода; *13* – вращающийся электрод; *14* – блок питания 24 В

Принцип действия работы установки основан на контактном взаимодействии вращающегося электрода с внутренней поверхностью подпятника (рисунок 5.21).

Рисунок 5.21 – Процесс обработки поверхности – контакт вращающегося электрода с обрабатываемой поверхностью

Электрический привод представляет собой конструкцию из электродвигателя *12* и электрода *13* (см. рисунок 5.20), закрепленную на центральном валу *5*, который приводится во вращение электродвигателем *1* через механический редуктор *10* с передаточным отношением 1:30, понижающий обороты вращения, что обеспечивает вращение конструкции с электродом по внутренней окружности обрабатываемой поверхности *6*. Центральный вал *5* закрепляется в вилке *11*, оснащенной резьбой М30×1,5 для крепления центрального вала с направляющими для перемещения вверх-вниз, что обеспечивает позиционирование конструкции с электродом в вертикальном направлении. Фиксирующая вилка *11* крепится в несущую консоль *3*, которая, в свою очередь, крепится, используя мертвую точку проушины *7* в надрессорной балке *8*, с возможностью более точного регулирования положения центрального вала и исключения люфтов в процессе работы, которое осуществляется регулировочными винтами с помощью шаблона – дополнительного крепления в

конструкции установки, что обеспечивает равномерный процесс обработки поверхности.

Конструкцией установки обработки поверхности предусмотрено автоматическое реверсивное переключение электродвигателя *1* привода центрального вала с помощью блока концевых выключателей *2* (см. рисунок 5.20) при положении электрода в крайних точках, что обеспечивает рабочий проход вверх-вниз при обработке поверхности подпятника.

Генератор технологических импульсов тока АРТА-5Л – 9, имеет следующие параметры: рабочий ток 80…160 А; частота импульсов 1…1,5 кГц; длительность импульсов 60…100 мкс. Блок питания *14* (см. рисунок 5.20) служит источником питания для электродвигателя привода вращающегося электрода.

Верхняя часть наружного бурта является базирующей плоскостью для ориентации вертикального вала электродного инструмента перпендикулярно опорной плоскости подпятника. Центральный вал должен при этом входить в центрирующую (специальную) втулку (Приложение 5, рисунок П5.1), находящуюся на внутреннем бурте подпятника и представляющую собой шкворневое отверстие для обеспечения устойчивого и точного положения вала в процессе работы установки.

Процесс обработки поверхности сопровождается непрерывным вращением центрального вала и дискового электрода по всей поверхности подпятника. Для обеспечения питания электродвигателя привода вращающегося электрода, а также непрерывного вращения самого электрода и подвода импульсного тока от генератора к электроду центральный вал, а также вал привода электрода оснащены медными кольцами *4* (см. рисунок 5.20), являющимися составным элементом скользящих (щеточных) контактов, что наглядно отражено на схеме установки, которая приведена в Приложении 5 (см. рисунок П5.1).

Модифицированная поверхность на завершающей стадии процесса обработки должна быть однородной, сплошной, без пропусков. Технология обработки поверхности подпятника проходила испытания на Западно-Сибирской железной дороге в вагоноремонтном депо г. Татарск Новосибирской области. В

качестве смазочного материала применялась ПУМА с присадкой $CaCo[(PO_3)_4]_\infty$, по свойствам аналогичная присадке $CaZn[(PO_3)_4]_\infty$ и $NiZn[(PO_3)_4]_\infty$.

Все геометрические размеры узла «пятник – подпятник» до и после эксплуатационных испытаний, а также номера вагонов (30801054, 30804116, 30635544, 30801005, 30816367) и номера надрессорных балок (04952, 119, 26679, 2992, 2977, 20705, 26348, 3488, 8380, 3544) были внесены в протоколы (таблицы 5.1 и 5.2).

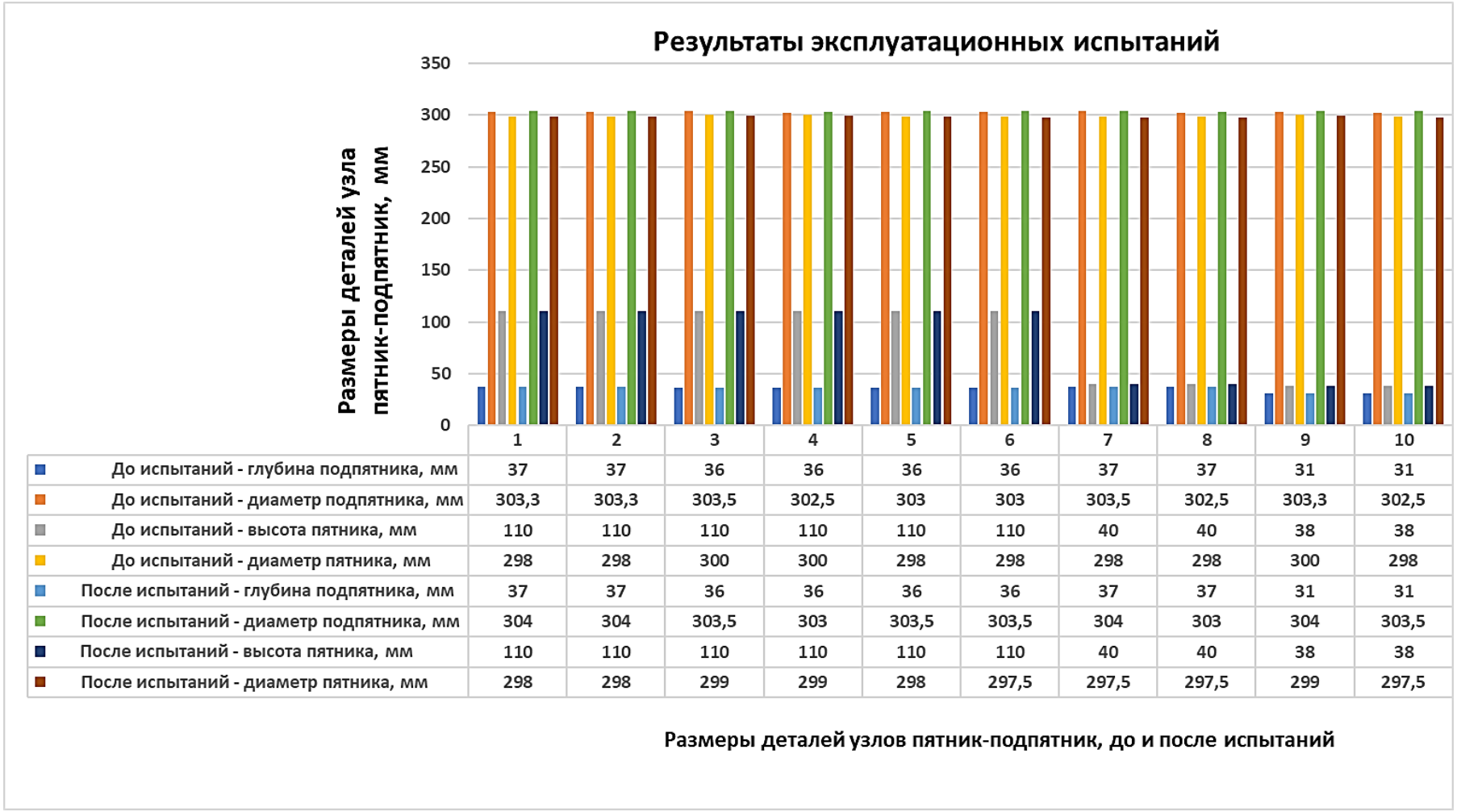
Таблица 5.1 – Исходные параметры деталей узла «пятник – подпятник» до испытаний

№ вагона	№ надрессорной балки	Год выпуска	Глубина подпятника, мм	Диаметр подпятника, мм	Высота пятника, мм	Диаметр пятника, мм
30801054	04952	2009	37	303,3	110	298
	119	1991	37	303,3	110	298
30804116	26679	1988	36	303,5	110	300
	2992	1988	36	302,5	110	300
30635544	2977	1986	36	303,0	110	298
	20705	1987	36	303,0	110	298
30801005	26348	2008	37	303,5	40	298
	3488	2003	37	302,5	40	298
30816367	8380	1988	31	303,3	38	300
	3544	1999	31	302,5	38	298

Таблица 5.2 – Фактические параметры деталей узла «пятник – подпятник» после испытаний

№ вагона	№ надрессорной балки	Год выпуска	Глубина подпятника, мм	Диаметр подпятника, мм	Высота пятника, мм	Диаметр пятника, мм
30801054	04952	2009	37	304	110	298,0
	119	1991	37	304	110	298,0
30804116	26679	1988	36	303,5	110	299,0
	2992	1988	36	303	110	299,0
30635544	2977	1986	36	303,5	110	298,0
	20705	1987	36	303,5	110	297,5
30801005	26348	2008	37	304	40	297,5
	3488	2003	37	303	40	297,5
30816367	8380	1988	31	304	38	299,0
	3544	1999	31	303,5	38	297,5

На рисунке 5.22 представлены данные эксплуатационных испытаний из таблиц 5.1 и 5.2 для пяти грузовых вагонов.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
До испытаний - глубина подпятника, мм	37	37	36	36	36	36	37	37	31	31
До испытаний - диаметр подпятника, мм	303,3	303,3	303,5	302,5	303	303	303,5	302,5	303,3	302,5
До испытаний - высота пятника, мм	110	110	110	110	110	110	40	40	38	38
До испытаний - диаметр пятника, мм	298	298	300	300	298	298	298	298	300	298
После испытаний - глубина подпятника, мм	37	37	36	36	36	36	37	37	31	31
После испытаний - диаметр подпятника, мм	304	304	303,5	303	303,5	303,5	304	303	304	303,5
После испытаний - высота пятника, мм	110	110	110	110	110	110	40	40	38	38
После испытаний - диаметр пятника, мм	298	298	299	299	298	297,5	297,5	297,5	299	297,5

Рисунок 5.22 – Геометрические размеры подпятников до и после эксплуатационных испытаний

Из результатов эксплуатационных испытаний следует, что незначительному износу был подвержен диаметр подпятника, в то время как остальные поверхности трения остались практически без изменений, что говорит о достаточной эффективности работы «пятникового» узла трения.

5.3 Выводы по главе 5

1 Разработанная технология комбинированного модифицирования трибосопряжения пятникового узла с помощью электроискрового легирования и использования пластичных смазочных материалов с метафосфатными присадками позволила достичь высоких трибологических характеристик, позволяющих снизить энергетические затраты, увеличить межремонтный интервал в процессе эксплуатации, что получило подтверждение при проведении стендовых и эксплуатационных испытаний.

2 Технология получила положительный отзыв в акте о внедрении результатов научных исследований в вагонном ремонтном депо Татарская ВЧДР-4 Западно-Сибирской дирекции по ремонту пути, по состоянию на 18.09.2015, и ее применение позволит уменьшить материальные затраты на ремонт и восстановление изношенных пар трения «пятник – подпятник» (Приложение 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена методика и разработана технология модифицирования поверхности трения на основе метода электроискровой обработки поверхности в жидких средах, что позволило увеличить твёрдость на 40%.

2. Разработаны многофункциональные присадки неорганической природы на основе двойных метафосфатов, улучшающие физико-химические и трибологические свойства пластичных смазочных материалов и обладающие высокой степенью полимеризации, что позволяет полимерным молекулам структурно встраиваться в рельеф поверхности металла с последующим образованием пленок переноса.

3. Квантово-химические расчеты энергии связи молекулы $CaZn[(PO_3)_4]_\infty$ с поверхностью металла – кластерами железа, состоящими из 13 атомов позволили установить, что энергия связи данной молекулы составляет для фрагментов CaO_2 = 10 эВ, для PO_4 = 10,1 эВ, а энергия связи высших жирных кислот (группа $-COOH-$) с железом = 7,1 эВ, что обеспечивает повышение эффективности предложенной присадки, более чем на 30 %.

4 Экспериментально доказано, что при трении модифицированной вольфрамом поверхности металлического контртела за счет термомеханодеструкции в зоне контактирования выделяются атомы вольфрама, которые замещают атомы Fe в узлах кристаллических решеток феррита, делая его легированным твердым раствором Fe_α(W) и тем самым достигается упрочняющий эффект поверхности трисопряжения.

4. Лабораторные трибологические испытания смазочных материалов с присадками двойных метафосфатов $CaZn[(PO_3)_4]_\infty$увеличивают износостойкость более чем на 20 %. Результаты стендовых испытаний смазочных материалов с присадкой $NiZn[(PO_3)_4]_\infty$ подтвердили повышение износостойкости более чем на 25 %.

5. Проведены эксплуатационные испытания, показывающие эффективность комбинированного метода модифицирования поверхности трения с увеличением

износостойкости в 1,5 раза, что подтверждается актами эксплуатационных испытаний.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме данной работы

1 Разработанная технология повышения износостойкости тяжелонагруженных трибосистем путем применения комбинированного метода модифицирования поверхности трения открывает возможности его использования не только в узлах трения подвижного состава, но и в авиации, морском и наземном транспорте, в подъемно-транспортных механизмах, строительных и других машин.

2 Установленные в диссертации закономерности, а также механизм влияния электроискрового легирования и формирования поверхностных структур из пластичных смазочных материалов с применением разработанных присадок могут служить основой для создания нового класса смазочных материалов, обеспечивающих формирование на поверхности трибосопряжения пленок фрикционного переноса – вторичных поверхностных структур.

3 Разработанная и запатентованная многофункциональная машина трения, представленная в диссертации, позволяет проводить исследования трибоэлектрических явлений, весьма перспективных для поиска возможностей создания нового класса смазочных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Анализ проблемы износа в зоне контакта «пятник-подпятник» грузового подвижного состава и пути ее минимизации / Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, А. В. Ромашов, С. В. Трескин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2023. – № 1(77). – С. 116–126. – DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).116-126.

2 **Заверталюк, А. В.** Влияние технического состояния узлов опирания грузовых вагонов на сопротивление повороту тележек / А. В. Заверталюк // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2000. – № 3. – С. 9–12. – ISSN 0869-8163.

3 **Воронин, Н. Н.** Разработка метода оценки ресурса пятникового узла вагона по критерию износа : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Николай Николаевич Воронин. – Москва, 1999. – 16 с.

4 Оценка работы сил трения в боковом контакте «колесо-рельс» и на сопрягаемых поверхностях пятникового узла грузовых вагонов методами компьютерного моделирования / В. И. Колесников, А. П. Сычёв, А. А. Зарифьян [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. − 2015. − № 1(57). – С. 13–21. – ISSN 0201-727X.

5 **Васильев, С. М.** Особенности работы узла «пятник-подпятник» в вагонах-платформах для перевозки крупнотоннажных контейнеров / С. М. Васильев, А. В. Пищик // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI Международной научно-практической конференции. В 2 ч. – Гомель, 2021. — Ч. 1. – С. 93–94. – ISBN 978-985-891-052-5.

6 Влияние коэффициента трения в узле «пятник-подпятник» грузовых вагонов на работу сил трения при движении вагона в кривой / В. И. Колесников, А. А. Зарифьян, А. П. Сычев, И. В. Колесников // Трение и износ. – 2016. – Т. 37, № 5. – С. 614–622. – ISSN 0202-4977.

7 Особенности конструкции современных грузовых вагонов : учебное пособие / А. В. Челохьян, В. Ф. Криворудченко, О. А. Ворон [и др.] ; под редакцией В. Ф. Криворудченко. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2011. – 403 с.

8 Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием подвижного состава. Том 1. Грузовые вагоны / перевод с английского под редакцией С. М. Захарова. – Москва : ВНИИЖТ, 2021. – 456 с. – ISBN 978-5-4465-3293-3.

9 **Дубинин, В. М.** Анализ износостойкости и разработка предложений по повышению надежности пятниковых узлов грузовых вагонов / В. М. Дубинин // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2010. – № 12. – С. 41–46. – ISSN 2310-9351.

10 **Сергеев, И. К.** Обзор исследований и программных комплексов для решения задач динамики подвижного состава / И. К. Сергеев, С. В. Беспалько // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 1. – С. 45–50. – ISSN 2074-9325.

11 Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ : сборник тезисов конференции, Брянск, 03-04 апреля 2018 года. – Брянск : Брянский государственный технический университет, 2018. – 78 с. – ISBN 978-5-906967-87-9.

12 **Патент RU 2 574 548 C1**. Способ нанесения антифрикционных покрытий на упорные поверхности пятникового узла / В. И. Колесников, А. П. Сычев, А. В. Лапицкий [и др.]. – № 2014146880/02 ; заявл. 21.11.2014 ; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4. – 5 с.

13 Модификация контактных поверхностей пятникового узла грузовых вагонов с целью увеличения эксплуатационного ресурса / А. А. Зарифьян, В. И. Колесников, А. П. Сычев, И. В. Колесников, А. А Сычев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. − 2014. − № 2(54). – С. 27–33. – ISSN 0201-727X.

14 **Крагельский, И. В.** Трение и износ / И. В. Крагельский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1968. – 480 с.

15 **Гаркунов, Д. Н.** Триботехника / Д. Н. Гаркунов. – Москва : Машиностроение, 1989. – 352 с.

16 **Головин, С. А.** Микропластичность и усталость металлов / С. А. Головин, А. Пушкар ; под редакцией С. А. Головина. – Москва : Металлургия, 1980. – 239 с.

17 **Morel, F.** A critical plane fatigue model applied to out-of-phase bending and torsion load condition / Franck Morel // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – Blackwell Science Ltd., 2001. – Vol. 24. – P. 153–164. – DOI 10.1046/j.1460-2695.2001.00390.x.

18 A multiparameter approach to the prediction of fatigue crack growth in metallic materials / A. B. O. Soboyejo, S. Shademan, M. Foster, N. Katsube, W. O. Soboyejo // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – Blackwell Science Ltd., 2001. – Vol. 24. – P. 225–242. – DOI 10.1046/j.1460-2695.2001.00404.x.

19 **Голего, Н. П.** Фреттинг-коррозия металлов / Н. П. Голего, А. Я. Алябьев, В. В. Шевеля. – Киев : Техника, 1974. – 270 с.

20 **Уотерхауз, Р. Б.** Фреттинг-коррозия / Р. Б. Уотерхауз ; перевод с английского Е. А. Хейна, А. В. Ильина ; под редакцией Г. Н. Филимонова. – Ленинград : Машиностроение, 1976. – 271 с.

21 **Ищук, Ю. Л.** Состав, структура и свойства пластичных смазок / Ю. Л. Ищук. – Киев : Наукова думка, 1996. – 643 с.

22 **Кокрофт, М. Г.** Смазка и смазочные материалы / М. Г. Кокрофт ; перевод с английского Л. Б. Вульфович ; редактор перевода М. З. Ерманк. – Москва : Металлургия, 1970. – 110 с.

23 Теоретические основы химмотологии / А. А. Братков, Г. С. Шимонаев, А. Ф. Горенков [и др.] ; под редакцией А. А. Браткова. – Москва : Химия, 1985. – 315 с.

24 Трение, изнашивание и смазка : справочник / под редакцией И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – Москва : Машиностроение, 1979. – 358 с.

25 **Григорьев, А. Я.** Физика и микрогеометрия технических поверхностей / А. Я. Григорьев. – Минск : Беларусская навука, 2016. – 247 с.

26 Исследование микрорельефа обработанных поверхностей с помощью метода фрактальных сигнатур / А. А. Попов, В. В. Булавкин, В. А. Герман, О. Ф. Вячеславова // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75, № 5. – С. 28–45. – ISSN 0044-4642.

27 **Томас, Т. Р.** Топографические параметры шероховатости / Т. Р. Томас, О. А. Горленко // Трение и износ. – 1990. – Т. 11, № 3. – С. 551–555. – ISSN 0202-4977.

28 **Хусу, А. П.** Шероховатость поверхности (теоретико-вероятностный подход) / А. П. Хусу, Ю. Р. Виттенберг, В. А. Пальмов. – Москва : Наука, 1975. – 344 с.

29 Анализ влияния наполнения композита маслом на состояние поверхности металлического контртела / П. Г. Иваночкин, Е. С. Новиков, А. И. Азоян, М. Д. Аникина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 3(71). – С. 16–22. – ISSN 0201-727X.

30 Товарные нефтепродукты, свойства и применение : справочник / под редакцией В. М. Школьникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Химия, 1978. – 472 с.

31 **Тертерян, Р. А.** Депрессорные присадки к нефтям, топливам и маслам / Р. А. Тертерян. – Москва : Химия, 1990. – 239 с.

32 Смазочные и защитные материалы / И. Н. Колотухин, В. Г. Кузнецов, С. Н. Казарновский, В. А. Цареградский. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1965. – 172 с.

33 **Kajdas, C. K.** Importance of the triboemission process for tribochemical reaction / C. K. Kajdas // Tribology International. – 2005. – Vol. 38(3). – P. 337–353. – DOI 10.1016/j.triboint.2004.0.

34 **Kajdas, C.** Tribochemistry, tribocatalysis, and the negative-ion-radical action mechanism / C. Kajdas, K. Hiratsuka // Proceedings of the Institution of Mechanical

Engineers. Part J : Journal of Engineering Tribology. – 2009. – Vol. 223(6). – P. 827–848. – DOI 10.1243/13506501jet514.

35 Исследование смазочных материалов при трении : сборник статей / АН СССР, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова ; ответственный редактор Р. М. Матвеевский. – Москва : Наука, 1981. – 144 с.

36 **Заславский, Ю. Г.** Механизм действия противоизносных присадок к маслам / Ю. Г. Заславский, Р. Н. Заславский. – Москва : Химия, 1978. – 224 с.

37 **Карташевич, А. Н.** Топливо, смазочные материалы и технические жидкости / А. Н. Карташевич, В. С. Товстыка, А. В. Гордеенко. – Минск : Новое знание ; Москва : ИНФРА-М, 2014. – 421 с. – ISBN 978-5-16-010298-6.

38 **Погодаев, Л. И.** Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин / Л. И. Погодаев, В. Н. Кузьмин. – Санкт-Петербург : Академия транспорта РФ, 2006. – 608 с. – ISBN 5-901810-11-2.

39 Лабораторные исследования геомодификатора «Трибо» / И. Г. Мироненко, В. Б. Ломухин, А. Ф. Певнев [и др.] // Трение, износ, смазка. – 2002. – Т. 4, № 4. – С. 109–122.

40 **Петров, В. М.** Применение модификаторов в узлах машин для решения триботехнических задач / В. М. Петров. – Санкт-Петербург : СПбГПУ, 2004. – 282 с. – ISBN 5-7422-0608-9 (в обл.).

41 **Погодаев, Л. И.** Влияние геомодификаторов трения на работоспособность трибосопряжений / Л. И. Погодаев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 1. – С. 58–67. – ISSN 0235-7119.

42 **Гончаренко, Ю. В.** Восстанавливающие антифрикционные препараты / Ю. В. Гончаренко, В. М. Петров, А. Ю. Шабанов. – Москва : Русэкотранс, 2003. – 40 с.

43 **Половинкин, В. Н.** Антифрикционная противоизносная добавка в смазочные материалы минерального происхождения (геомодификатор трения) /

В. Н. Половинкин, В. Б. Лянной, Ю. Г. Лавров // Трение, износ, смазка. – 1999. – Т. 1, № 1. – С. 127–140.

44 **Белый, А. В.** Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А. В. Белый, Г. Д. Карпенко, Н. К. Мышкин. – Москва : Машиностроение, 1991. – 208 с. – ISBN 5-217-01411-3.

45 **Хопин, П. Н.** Трибология / П. Н. Хопин, С. В. Шишкин. – Москва : Юрайт, 2021. – 236 с. – ISBN 978-5-534-14021-7.

46 **Дудан, А. В.** Повышение триботехнических свойств пластичной смазки, используемой для тяжелонагруженных узлов трения автомобилей / А. В. Дудан, Т. В. Вигерина // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сборник статей Международной научно-технической конференции, Брест, 20-21 октября 2022 г. / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет ; редколлегия : С. Р. Онысько [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2022. – С. 230–233.

47 Повышение износостойкости деталей тяжелонагруженных узлов трения автомобилей / А. В. Дудан, Т. В. Вигерина, В. И. Кравчук, И. И. Пилипенок // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2022. – № 10. – С. 25–30. – ISSN 2070-1616.

48 Повышение износостойкости узлов трения применением композиционных смазок с гетерогенной структурой / О. В. Лебедев, О. М. Пономарева, Р. Р. Хакимзянов, Г. К. Аннакулова, В. А. Поскребышев // Системы. Методы. Технологии. – 2009. – № 2(2). – С. 20–23. – ISSN 2077-5415.

49 **Ежов, Ю. Е.** Влияние состава смазочных композиций на топографию поверхностей трения сопряженных деталей / Ю. Е. Ежов, Л. И. Погодаев, А. А. Кузьмин // Журнал университета водных коммуникаций. – 2012. – № 2. – С. 47–54.

50 **Крагельский, И. В.** Оценка склонности к пленочному голоданию пластичных смазочных материалов / И. В. Крагельский, Н. В. Гитис // Трение и износ. – 1983. – Т. IV, № 1. – С. 12–17. – ISSN 0202-4977.

51 **Натапов, Б. С.** Термическая обработка металлов / Б. С. Натапов. – Киев : Вища школа. Головное изд-во, 1980. – 288 с.

52 **Герасимова, Н. С.** Химико-термическая обработка сталей и сплавов / Н. С. Герасимова. – Калуга : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 48 с.

53 **Некрасов, А. Ю.** Разработка установки электродуговой металлизации. Определение оптимальных режимов процесса металлизации / А. Ю. Некрасов, В. В. Каратыш // Master's Journal. – 2013. – № 1. – С. 128–139. – ISSN 2306-8590.

54 **Новиков, И. И.** Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Металлургия, 1986. – 480 с.

55 **Рош, В. А.** Повышение конструкционной износостойкости сталей за счет термической и химико-термической обработки / В. А. Рош // Технико-технологическое обеспечение инноваций в агропромышленном комплексе : материалы I Международной научно-практической конференции молодых ученых, Мелитополь, 27-28 февраля 2023 г. / редколлегия : О. А. Еременко [и др.]. – Мелитополь : Мелитопольский государственный университет, 2023. – С. 368–369.

56 Characteristics of Ni-based coating layer formed by laser and plasma cladding processes / G. Xu, M. Kutsuna, Z. Liu, H. Zhang // Materials Science and Engineering A. – 2006. – Vol. 417(1). – P. 63–72. – DOI 10.1016/j.msea.2005.08.192.

57 **Уваров, В. В.** Современные методы термической обработки стальных деталей машин и инструментов / В. В. Уваров, В. С. Уварова, Е. А. Носова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Самара : СГАУ, 2008. – 120 с. – ISBN 978-5-7883-0594-3.

58 **Кораблев, А. И.** Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач / А. И. Кораблев, Д. Н. Решетов ; под редакцией Д. Н. Решетова. – Москва : Машиностроение, 1968. – 288 с.

59 Материаловедение. Теория и технология термической обработки / Г. Н. Гаврилов, Е. Н. Каблов, В. Т. Ерофеев [и др.] ; под редакцией Е. Н. Каблова, Г. Н. Гаврилова. – Саранск : Мордовский университет, 2019. – 276 с. – ISBN 978-5-7103-3920-6.

60 **Czerwinski, F.** Thermochemical treatment of metals // Heat treatment – conventional and novel applications. Chapter 5 / edited by Frank Czerwinski. – Intech open, 2012. – DOI 10.5772/51566.

61 **Solovyov, D. L.** Increasing to longevity of the machine parts by creation of the hardening heterocyclic structure / D. L. Solovyov, A. V. Kirichek, S. V. Barinov // Heavy machine building. – 2010. – №. 7. – P. 3–7.

62 **Киричек, А. В.** Технология упрочнения волнами деформации / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев // Машиностроительные технологии и инструменты. – 2012. – № 2-2(292). – С. 13–17. – ISSN 2073-7408.

63 **Sevostyanov, A.** Research of surface plastic deformation processing methods in Russia / A. Sevostyanov, I. Bobrovskij, A. Lukyanov // Theoretical & Applied Science. – 2014. – Vol. 16(08). – P. 24–29. – DOI 10.15863/TAS.2014.08.16.3.

64 **Афонин, А. Н.** Гетерогенное упрочнение деталей горно-металлургических машин поверхностным пластическим деформированием / А. Н. Афонин, А. И. Ларин, А. В. Макаров // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2015. – № 58(11). – С. 823–827. – DOI 10.17073/0368-0797-2015-11-823-827.

65 **Киричек, А. В.** Технология комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией конструкционных низколегированных сталей / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, С. А. Силантьев // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2017. – № 8. – С. 30–35. – ISSN 2223-4608.

66 **Селиванов, А. С.** Качественный анализ особенностей износа и разрушения инструмента при ультразвуковом выглаживании деталей машин / А. С. Селиванов, А. А. Балахнина, И. В. Сорока // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2018. – № 3. – С. 57–62. – DOI 10.18323/2073-5073-2018-3-57-62.

67 Технологическое обеспечение качества и эксплуатационных свойств упрочнением волной деформации / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, С. А. Силантьев, С. О. Федонина // Вестник Иркутского государственного технического

университета. – 2018. – № 22(12). – С. 46–55. – DOI 10.21285/1814-3520-2018-12-46-55.

68 Expanding technological capabilities of the combined hardening of steel by deformation / A. V. Kirichek, O. N. Fedonin, D. L. Soloviyov, S. O. Fedonina // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 297. – Article no. 05004. – DOI 10.1051/matecconf/201929705004.

69 **Radchenko, V. P.** The effect of surface plastic hardening technology, residual stresses and boundary conditions on the buckling of a beam / V. P. Radchenko, O. S. Afanaseva, V. E. Glebov // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2020. – № 1. – P. 87–98. – DOI 10.15593/perm.mech/2020.1.07.

70 **Ohtsuka, T.** Corrosion protection of steels by conducting polymer coating / Toshiaki Ohtsuka // International Journal of Corrosion. – 2012. – Vol. 5. – DOI 10.1155/2012/915090.

71 Electrochemical Characterization of Polymeric Coatings for Corrosion Protection : A Review of Advances and Perspectives / A. Trentin, A. Pakseresht, A. Duran, Y. Castro, D. Galusek // Polymers. – 2022. – Vol. 14(12). – DOI 10.3390/polym14122306.

72 **Лазаренко, Б. Р.** Электроискровая обработка токопроводящих материалов / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко. – Москва : Академия наук СССР, 1958. – 184 с.

73 **Лазаренко, Н. И.** Электроискровое легирование металлических поверхностей / Н. И. Лазаренко. – Москва : Машиностроение, 1976. – 44 с.

74 **Лазаренко, Н. И.** Электроискровое легирование металлических поверхностей / Н. И. Лазаренко // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 3. – С. 12–16. – ISSN 0013-5739.

75 **Иванов, Г. П.** Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин / Г. П. Иванов. – Москва : Машгиз, 1961. – 303 с.

76 **Тарельник, В. Б.** Улучшение служебных характеристик поверхностных слоев на основе железа за счет применения композиционных электроэрозионных

покрытий / В. Б. Тарельник // Электронная обработка материалов. – 1995. – № 4. – С. 61–62. – ISSN 0013-5739.

77 **Верхотуров, А. Д.** Технология электроискрового легирования металлических поверхностей / А. Д. Верхотуров, И. М. Муха. – Киев : Техника, 1988. – 181 с.

78 **Верхотуров, А. Д.** Физико-химические основы электроискрового легирования металлических поверхностей / А. Д. Верхотуров. – Владивосток : Дальнаука, 1992. – 175 с. – ISBN 5-7442-0338-9.

79 Электроискровое легирование металлических поверхностей / Г. В. Самсонов, А. Д. Верхотуров, Г. А. Бовкун, В. С. Сычев – Киев : Наукова думка. 1976. – 220 с.

80 **Коротаев, Д. Н.** Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискровым легированием : монография / Д. Н. Коротаев. – Омск : СибАДИ, 2009. – 255 с.

81 Электроискровое легирование металлических поверхностей / А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов, Н. Я. Парканский, В. М. Ревуцкий ; редактор Ю. Н. Петров. – Кишинев : Штиинца, 1985. – 198 с.

82 Электродные материалы для электроискрового легирования / А. Д. Верхотуров, И. А. Подчерняева, Ф. Ф. Егоров, Л. Ф. Прядко. – Москва : Наука, 1988. – 224 с.

83 Effect of Nanosized Powders on the Structure and Properties of Electrospark Alloyed Coatings / E. Levashov, O. Malochkin A. Kudryashov, F. Gammel, R. Suchentrunk // Journal of Materials Synthesis and Processing. – 2001. – Vol. 9(4). – P. 199–206. – DOI 10.1023/A:1014002919759.

84 **Николенко, С. В.** Новые электродные материалы для электроискрового легирования : монография / С. В. Николенко, А. Д. Верхотуров. – Владивосток : Дальнаука, 2005. – 219 с. – ISBN 5-8044-0404-0.

85 **Pyachin, S. A.** Formation of intermetallic coatings by electrospark deposition of titanium and aluminum on a steel substrate / S. A. Pyachin, A. A. Burkov // Surface

Engineering and Applied Electrochemistry. – 2015. – Vol. 51(2). – P. 118–124. – DOI 10.3103/S1068375515020131.

86 Влияние режимов электроискрового легирования и электродных материалов на структуру и износостойкость покрытий / А. Д. Верхотуров, Ю. И. Мулин, Е. С. Астапова [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2004. – № 3. – С. 17–21. – ISSN 0013-5739.

87 **Мулин, Ю. И.** Особенности образования износостойких покрытий при механизированном процессе электроискрового легирования / Ю. И. Мулин, Д. В. Ярков // Электронная обработка материалов. – 2004. – № 5. – С. 7–13. – ISSN 0013-5739.

88 **Задиранов, А. Н.** Энергораспределение в процессах электроискрового легирования / А. Н. Задиранов, Н. С. Грузд, В. В. Виноградов // Известия Национальной академии наук Кыргызской Республики. – 2011. – № 2. – С. 49–54. – ISSN 0002-3221.

89 **Бершадский, Л. И.** Структурная термодинамика трибосистем / Л. И. Бершадский. – Киев : Знание, 1990. – 253 с.

90 **Костецкий, Б. И.** Износостойкость деталей машин / Б. И. Костецкий. – Москва : Машгиз, 1960. – 168 с.

91 **Машков, Ю. К.** Структурно-термодинамическая концепция механизмов синтеза и эволюции композиционных материалов и трибосистем / Ю. К. Машков // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 6. – С. 586–597. – ISSN 0202-4977.

92 **Ершов, В. М.** Фазовый состав стальной поверхности после электроискрового легирования в жидкой среде / В. М. Ершов // Сборник научных трудов сотрудников ДонГТУ. – 2012. – № 38. – С. 170–178.

93 Справочник по триботехнике В 3 т. Т. 1 : Теоретические основы / под общей редакцией М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение ; Варшава : ВКЛ, 1989. – 397 с. – ISBN 5-217-00616-1.

94 Смазка и смазочные материалы (трибологические аспекты смазки) / Ю. М. Лужнов, Ю. Н. Калачев, В. Д. Александров, М. В. Морщилов. – Москва : МАДИ, 2019. – 40 с.

95 **Филиппов, М. А.** Трение и антифрикционные материалы / М. А. Филиппов, О. Ю. Шешуков. – Екатеринбург : Уральский университет, 2021. – 204 с. – ISBN 978-5-7996-3389-9.

96 Справочник по триботехнике. В 3 т. Т. 2 : Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / под общей редакцией М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение ; Варшава : ВКЛ, 1990. – 411 с. – ISBN 5-217-00967-5.

97 **Климов, К. И.** Антифрикционные пластичные смазки. Основы применения / К. И. Климов. – Москва : Химия, 1988. –160 с.

98 Трение и изнашивание механизмов, смазочные материалы / С. А. Поляков, Л. А. Андриенко, В. В. Лычагин, Е. М. Кулешова. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 53 с. – ISBN 978-5-7038-5479-2.

99 Основы трибологии (трение, износ, смазка) / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше [и др.] ; под общей редакцией А. В. Чичинадзе. – 2-е изд. перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2001. – 663 с. – ISBN 5-217-03053-4.

100 Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение : справочник / И. Г. Анисимов, К. М. Бадыштова, С. А. Бнатов [и др.] ; под редакцией В. М. Школьникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Техинформ, 1999. – 536 с. – ISBN 5-89551-006-X.

101 Практическая трибология. Мировой опыт : сборник. В 2 т. Т. 2 / редактор А. В. Чичинадзе. – Москва : Союз науч. и инж. об-ний: Наука и техника, 1994. – 451 с. – (Международная инженерная энциклопедия).

102 **Заславский, Ю. С.** Трибология смазочных материалов / Ю. С. Заславский. – Москва : Химия, 1991. – 240 с.

103 **Дроздов, Ю. Н.** Состояние поверхностных слоев контакта катящихся со скольжением роликов при трении с пластичной смазкой / Ю. Н. Дроздов, С. Ф. Мугнецян // Вестник машиностроения. – 1993. – № 1. – С. 11–13. – ISSN 0042-4633.

104 **Иванов, Р. Г.** Смазочные масла и консистентные смазки: ассортимент и применение / Р. Г. Иванов. – Москва : Стандартгиз, 1949. – 152 с.

105 Смазочные свойства пластичных смазочных материалов со структурированными нанопорошковыми загустителями / Г. И. Шульга, Е. В. Скринников, А. О. Колесниченко, А. Н. Конечный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 4. – С. 108–115. – ISSN 0201-727X.

106 **Курбатова, М. В.** Влияние компонентного состава на свойства бентонитовых смазок / М. В. Курбатова, И. А. Любинин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2013. – № 3. – С. 18–23. – ISSN 1819-2092.

107 **Маньковская, Н. К.** Химия и технология жирового сырья для пластичных смазок / Н. К. Маньковская. – Москва : Химия, 1976. – 93 с.

108 Смазки: производство, применение, свойства : справочник / под редакцией Тео Манга, Уилфида Дрезеля ; перевод 2-го английского издания под редакцией В. М. Школьникова. – Санкт-Петербург : Профессия, 2010. – 943 с.

109 Пластичные смазки на неорганических загустителях / Ю. Л. Ищук, О. И. Уманская, Р. Н. Абаджева, А. А. Янив. – Москва : ЦНИИТ Энефтехим, 1987. – 83 с.

110 **Дроздов, Ю. Н.** Прикладная трибология: (трение, износ, смазка в технических системах) / Ю. Н. Дроздов, Е. Г. Юдин, А. И. Белов ; под общей редакцией Ю. Н. Дроздова. – Москва : Эко-Пресс, 2010. – 604 с. – ISBN 978-5-904301-46-0.

111 **Кузнецов, А. В.** Топливо и смазочные материалы / А. В. Кузнецов. – Москва : КолосС, 2007. – 198 с. – ISBN 978-5-9532-0525-2.

112 **Синицын, В. В.** Подбор и применение пластичных смазок / В. В. Синицын. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Химия, 1974. – 414 с.

113 **Синицын, В. В.** Пластичные смазки и оценка их качества. Зарубежные стандарты и спецификации / В. В. Синицын. – Москва : Стандарты, 1975. – 191 с.

114 Краткая химическая энциклопедия. В 5 т. Т. 4 : Пирометаллургия / редакционная коллегия : И. Л. Кнунянц [и др.]. – Москва : Советская энциклопедия, 1965. – 1182 с.

115 **Эминов, Е. А.** Смазка оборудования промышленных предприятий / Е. А. Эминов, А. А. Козорезова. – Москва : Химия, 1966. – 176 с.

116 **Ваванов, В. В.** Автомобильные пластичные смазки / В. В. Ваванов, В. В. Вайншток, А. А. Гуреев. – Москва, 1986. – 144 с.

117 **Синицын, В. В.** Пластичные смазки за рубежом : справочник / В. В. Синицын. – Москва : Химия, 1983. – 327 с.

118 **Синицын, В. В.** Пластичные смазки в СССР : справочник/ В. В. Синицын. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Химия, 1984. – 190 с.

119 **Заславский, Ю. С.** Новое в трибологии смазочных материалов / Ю. С. Заславский. – Москва : Нефть и газ, 2001. – 478 с.

120 **Аржанухин, Г. В.** Эксплуатационные материалы: топливо, смазочные материалы и технические жидкости / Г. В. Аржанухин ; Московский государственный индустриальный университет. – Москва : МГИУ, 2007. – 82 с. – ISBN 978-5-276-01050-2.

121 **Шаповалов, В. В.** Триботехника : учебник / В. В. Шаповалов, В. А. Кохановский, А. Ч. Эркенов ; под редакцией В. В. Шаповалова. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2017. – 348 с.

122 **Patent 3426076 USA**. Oxidatively stable alkylbiphenyls and terphenyls as non-spresading lubricants / Helen Mertwoy, Montgomery, and Henry Gisser, Philadelphia. – Ser. No. 568,680 U.S. ; filed 07/28/1966; publ. 02/04/1969.

123 Идентификация продуктов термического разложения некоторых алкилбифенилов / Н. М. Репкин, Т. Н. Нестерова, Ю. А. Дружинина [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55, № 11. – С. 21–25. – ISSN 0579-2991.

124 **Курбатова, М. В.** Влияние компонентного состава на свойства бентонитовых смазок / М. В. Курбатова, И. А. Любинин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2013. – № 3. – С. 18–22. – ISSN 1819-2092.

125 **Кламанн, Д.** Смазки и родственные продукты. Синтез, свойства, применение, международные стандарты / Дитер Кламанн ; перевод с английского Г. И. Липкина ; под редакцией Ю. С. Заславского. – Москва : Химия, 1988. – 486 с.

126 Пути повышения эффективности приготовления пластичных смазок / С. В. Корнеев, А. А. Корниенко, Н. Ю. Мачехин, А. А. Аноприенко // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. – 2014. – № 13. – С. 180–183.

127 Получение пластичных смазок на основе глубокоочищенных отработанных минеральных и синтетических моторных масел / В. В. Остриков, С. Н. Сазонов, В. И. Балабанов, В. В. Сафонов // Нефтехимия. – 2017. – Т. 57, № 4. – С. 443–452. – DOI 10.7868/S0028242117040098.

128 **Меркурьев, Г. Д.** Смазочные материалы на железнодорожном транспорте : справочник / Г. Д. Меркурьев, Л. С. Елисеев. – Москва : Транспорт, 1985. – 255 с.

129 Трибология – машиностроению : труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН, Ижевск, 19-21 ноября 2018 года. – Ижевск : Ижевский институт компьютерных исследований, 2018. – 662 с. – ISBN 978-5-4344-0559-1.

130 Улучшение трибологических свойств металлоплакирующих пластичных смазок комплексообразующими соединениями / Н. Ю. Онищук, А. С. Кужаров, А. А. Кутьков [и др.] // Трение и износ. – 1981. – Т. II, № 4. – С. 625–629. – ISSN 0202-4977.

131 **Трояновская, Г. И.** Исследования и перспективы применения самосмазывающихся материалов / Г. И. Трояновская, Т. А. Лобова // Трение и износ. – 1980. – Т. I, № 2. – С. 293–302. – ISSN 0202-4977.

132 **Гайнуллина, Л. Р.** Влияние индивидуальных сульфидов на стабильность против окисления трансформаторного масла и его электрические показатели / Л. Р. Гайнуллина // Проблемы региональной энергетики. – 2021. – № 4(52). – С. 23–30. – DOI 10.52254/1857-0070.2021.4-52.03.

133 **Тесакова, М. В.** Триботехнические свойства промышленных смазочных материалов с добавками ультрадисперсных медьсодержащих порошков / М. В. Тесакова, В. И. Парфенюк, В. А. Годлевский // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54, № 2. – С. 109–112.

134 Исследование влияния твердого смазочного материала на противоизносные, противозадирные и антифрикционные свойства пластичных смазок / А. Т. Крачун, Е. В. Зобов, В. Е. Морарь [и др.] // Трение и износ. – 1981. – Т. II, № 5. – С. 856–863. – ISSN 0202-4977.

135 **Ларионов, С. А.** Улучшение свойств пар трения машин и механизмов путем использования смазок с применением ультрадисперсных порошков металлов и сплавов / С. А. Ларионов, А. Г. Каренгин, А. Б. Пушкаренко // Триботехнология производству : тезисы докладов Второй региональной научно-технической конференции, г. Таганрог, 12-14 июня 1991 г. – Таганрог, 1991. – С. 119.

136 **Чихос, Х.** Системный анализ в трибонике / Хорст Чихос ; перевод с английского С. А. Харламова. – Москва : Мир, 1982. – 351 с.

137 **Демидова, Н. Е.** Формирование поверхностных пленок в присутствии смеси присадок, уменьшающих износ деталей текстильных машин / Н. Е. Демидова, С. М. Смирнова, М. Н. Быков // Триботехнология производству : тезисы докладов Второй региональной научно-технической конференции, г. Таганрог 12-14 июня 1991 г. – Таганрог, 1991. – С. 118.

138 Теоретические предпосылки разработки композиционных самосмазывающихся материалов и покрытий с фосфатными компонентами / В. Т. Логинов, О. М. Башкиров [и др.] // Триботехнология производству : тезисы докладов Второй региональной научно-технической конференции, г. Таганрог 12-14 июня 1991 г. – Таганрог, 1991. – С. 37–38.

139 **Лашхи, В. Л.** Особенности противоизносного действия присадок к смазочным маслам / В. Л. Лашхи, А. Б. Виппер // Трение и износ. – 1980. – Т. I, № 2. – С. 312–318. – ISSN 0202-4977.

140 **Ермаков, С. Ф.** Влияние смазочных материалов и присадок на триботехнические характеристики твердых тел. Ч. 1. Пассивное управление трением / С. Ф. Ермаков // Трение и износ. – 2012. – Т. 33, № 1. – С. 90–111.

141 **Ribalko, A. V.** Intensification of the anodic erosion in electrospark alloying by the employment of pulse GROUP / A. V. Ribalko, K. Korkmaz, O. Sahin // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202. – P. 3591–3599.

142 **Лазаренко, Б. Р.** Электроискровая обработка в воде и электролитах / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко // Электронная обработка материалов. – 1980. – № 1. – С. 5–8. – ISSN 0013-5739.

143 **Гарбиш, К. Г.** Электроэрозионная резка металлов проволочным электродом с применением адсорбционно-активных технологических сред / К. Г. Гарбиш, Г. Н. Мещеряков // Электронная обработка материалов. – 1980. – № 5. – С. 43–45. – ISSN 0013-5739.

144 Мещеряков, Г. Н. Влияние адсорбционных свойств межэлектродной среды на полярность и производительность электроэрозионной обработки / Г. Н. Мещеряков, Л. В. Май // Электронная обработка материалов. – 1975. – № 2. – С. 43-16.

145 Влияние поверхностно-активных веществ на шероховатость поверхности, обработанной электроэрозионным способом / Г. Н. Мещеряков [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1982. – № 3. – С. 5–7. – ISSN 0013-5739.

146 **Гарифуллин, А. А.** Рабочая жидкость в электроэрозионной обработке / А. А. Гарифуллин // Современная техника и технологии. – 2014. – № 12. – С. 56–59.

147 Исследование износостойкости стали 30Х после электроискрового легирования в жидких средах / Д. С. Мантуров, В. В. Авилов, П. Г. Иваночкин [и др.] // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4(61). – С. 77–83.

148 Инструкция о эксплуатации Zygo NewView 600s.

149 ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики : межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие с 01.01.1975 Постановлением Государственного комитета стандартов Совета министров СССР от 23.04.73 № 995 (с изм. № 1, 2, утвержденными в мае 1980 г., январе 2017 г. (ИУС 7-80, 7-2017). – Москва : Издательство стандартов, 2018. – 14 с.

150 ГОСТ Р 70117-2022. Шероховатость поверхности. Рекомендации по выбору : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23.05.2022 № 359-ст. – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 20 с.

151 Computed aided surface analysis for X-ray photoelectron spectroscopy (CASA XPS). Version 2.0. Casa XPS user’s manual. – Cheshire : Casa Software Ltd., 2001. – 151 p.

152 Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / под редакцией Д. Бриггса, М. П. Сиха. – Москва : Мир, 1987. – 600 с.

153 **Нефедов, В. И.** Рентгеноэлектронная спектроскопия химических соединений : справочник / В. И. Нефедов. – Москва : Химия, 1984. – 256 с.

154 Исследование влияния межэлектродной среды на результаты обработки стальной поверхности методом электроискрового легирования / А. В. Сидашов, П. Г. Иваночкин, С. А. Данильченко [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4(88). – С. 59–65. – DOI 10.46973/0201-727X2022459.

155 Трибологические испытания стальных образцов с модифицированной поверхностью методом электроискрового легирования в различных средах / И. В. Колесников, В. В. Авилов, М. В. Бойко, А. И. Воропаев // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2022. – № 36. – С. 32–35. – ISSN 2310-9351.

156 **Хайнике, Г.** Трибохимия / Г. Хайнике. – Москва : Мир, 1987. – 584 с.

157 Роль диффузионных и сегрегационных процессов в контактно усталостном разрушении рабочей поверхности железнодорожного колеса в металлополимерном сопряжении / В. И. Колесников, А. Т. Козаков, А. В. Сидашов, В. Н. Кравченко, А. П. Сычев // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2006. – № 8. – С. 22–32. – ISSN 1819-2092.

158 **Мигаль, Ю. Ф.** Квантово-химический анализ прочности межатомных связей на большеугловых границах зерен в железе / Ю. Ф. Мигаль, В. И. Колесников // Наука юга России. – 2018. – Т. 14, № 4. – С. 46–52. – DOI 10.7868/S25000640180406.

159 **Аносов, В. Я.** Основные начала физико-химического анализа / В. Я. Аносов, С. А. Погодин ; АН СССР, Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова. – Москва ; Ленинград : АН СССР, 1947. – 876 с.

160 Неорганические фосфорсодержащие полимерные присадки для пластичных смазочных материалов / В. И. Колесников, М. А. Савенкова, Ю. Ф. Мигаль, С. Ф. Ермаков, В. В. Авилов // Вестник Южного научного центра РАН. – 2011. – Т. 7, № 1. – С. 18–23. – ISSN 1813-4289.

161 Трибологические и физико-химические свойства смазочных композиций ПУМА и БУКСОЛ с полимерной фосфорсодержащей присадкой / В. И. Колесников, Ф. Даниэль, Ю. Ф. Мигаль, М. А. Савенкова, В. В. Авилов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 1(49). – С. 27–31. – ISSN 0201-727X.

162 Свойства смазочных материалов ПУМА и БУКСОЛ, модифицированных неорганическими присадками двойных полифосфатов / В. И. Колесников, М. А. Савенкова, В. В. Авилов, Ю. Ф. Мигаль, И. В. Колесников // Трение и износ. – 2015. – Т. 36, № 3. – С. 273–281. – ISSN 0202-4977.

163 Ресурсосберегающие технологии повышения качества и долговечности деталей, узлов и механизмов на нано-, мезо- и макроуровнях / Ю. С. Саркисов, В. А. Аметов, И. А. Курзина, Ю. А. Власов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, № 2. – С. 5–12. – ISSN 1684-8519.

164 **Авилов, В. В.** Оценка комплексного влияния электроискровой обработки поверхности трения и применения пластичных смазок с эффективными присадками на износостойкость тяжелонагруженных трибосистем / В. В. Авилов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4(95). – С. 8–16. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_3_8.

165 **Колесников, В. И.** Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах / В. И. Колесников ; РГУПС. – Москва : Наука, 2003. – 279 с. – ISBN 5-02-002843-6.

166 **Колесников, И. В.** Системный анализ и синтез процессов, происходящих в металлополимерных узлах трения фрикционного и антифрикционного назначения / И. В. Колесников ; РГУПС. – Москва : ВИНИТИ РАН, 2017. – 384 с. – ISBN 978-5-902928-72-0.

167 Improvement of the wear resistance and energy efficiency of heavy-loaded metal-polymer transport tribosystems / I. Kolesnikov, V. Osipov, V. Kolesnikov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2131(5). – P. 052036. – DOI 10.1088/1742-6596/2131/5/052036.

168 Энергосбережение на железнодорожном транспорте / под редакцией В. А. Гапановича. – Москва : МИСиС, 2012. – 619 с. – ISBN 978-5-87623-647-0 (в пер.).

169 **Анисимов, П. С.** Влияние конструкции и параметров тележки на износ колес и рельсов / П. С. Анисимов // Железнодорожный транспорт. – 1999. – № 6. – С. 38–42. – ISSN 0044-4448.

170 **Вериго, М. Ф.** Взаимодействие пути и подвижного состава в кривых малого радиуса и борьба с боковым износом рельсов и гребней колес / М. Ф. Вериго. – Москва : ПТКБ ЦП МПС, 1997. – 207 с.

171 **Погорелов, Д. Ю**. Универсальный механизм 7.0. Износ профилей колес и рельсов. Руководство пользователя / Д. Ю. Погорелов. – Текст: электронный. – 2012. – С. 7–8. – URL: http://www.universalmechanism.com/download/70/rus/16 _um_wheel_wear.pdf (дата обращения: 15.06.2025).

172 **Archard, J. F.** Contact and Rubbing of Flat Surfaces / J. F. Archard // Journal of Applied Physics. – 1953. – Vol. 24(8). – P. 981–988.

173 **Kalker, J. J.** Wheel-Rail Wear Calculation with the Program CONTACT / J. J. Kalker // Delft University of Technology. Reports of the Faculty of Mathematics and Informatics. – 1987. – № 33. – P. 87–02.

174 **Рауба, А. А.** Обеспечение работоспособности деталей подвижного состава в межремонтный период за счет повышения качества восстановления изношенных поверхностей / А. А. Рауба, Д. В. Муравьев, А. В. Обрывалин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 3(51). – С. 28–35. – ISSN 0201-727X.

175 **Мурадян, Л. А.** Теоретическая зависимость величины износа пары трения «пятник-подпятник» от пробега грузового вагона / Л. А. Мурадян, Д. А. Подосенов, В. Ю. Шапошник // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 6(72). – С. 61–69. – ISSN 2307-3489.

176 **Иванов, А. О.** Требования к эксплуатационным показателям узлов трения вагонов и смазочным материалам, применяемым в них, ставят перед разработчиками все новые задачи / А. О. Иванов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2008. – № 3(15). – ISSN 1817-6089.

177 **Горячева, И. Г.** Применение новых материалов в узлах трения / И. Г. Горячева // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 10. – С. 44–49. – ISSN 0044-4448.

178 The study of tribological properties of composites based on phenylone and hybrid fille / V. I. Kolesnikov, P. G. Ivanochkin, N. A. Myasnikova [et al.] // Proceedings of the 2016 International Conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. – New York : Nova Science Publishers, 2017. – P. 121–131.

179 Molecularly-Engineered Lubricants: Synthesis, Activation, and Tribological Characterization of Silver Complexes as Lubricant Additives / Christina P. Twist, Afif

M. Seyam, Changle Chen [et al.] // Advanced Engineering Materials. – 2012. – № 14. – P. 101–105.

180 **Chang, L.** Enhancement effect of nanoparticles on the sliding wear of short fiber-reinforced polymer composites: A critical discussion of wear mechanisms / Li Chang, Klaus Friedrich // Tribology International. – 2010. – Vol. 43, № 12. – P. 2355–2364.

181 **Филиппов, В. Н.** Снижение износа гребней колес грузовых вагонов за счет рационализации параметров узлов опирания кузова / В. Н. Филиппов, А. А. Тармаев, И. Жайсан // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4(40). – С. 11–17. – DOI 10.20291/2079-0392-2018-4-11-17.

182 **Дубинин, В. М.** Оценка влияния износа пятникового узла на динамику грузового вагона в эксплуатации сочетанием динамического и конечно-элементного анализа / В. М. Дубинин // Инновационный транспорт – 2016: специализация железных дорог : материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию основания Уральского государственного университета путей сообщения. – Екатеринбург : УрГУПС, 2017. – С. 622–631.

183 **Глушко, М. И.** Новое определение устойчивости экипажа / М. И. Глушко, Т. А. Антропова // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2016. – № 4(48). – С. 46–50. – ISSN 1817-6089.

184 **Глушко, М. И.** Условия схода подвижного состава / М. И. Глушко // Инновационный транспорт. – 2016. – № 4(22). – С. 66–69. – DOI 10.20291/2311-164X-2016-4-66-69.

185 Synthesis and study of triboengineering characteristics of a new nanosize ceramic nickel phosphoromolybdate additive to greases / V. I. Kolesnikov, M. A. Savenkova, N. A. Myasnikova [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2010. – Vol. 31, № 6. – P. 426–432.

186 Улучшение трибологических параметров смазочных материалов введением неорганической полимерной присадки / И. В. Колесников, М. А. Савенкова, А. П. Сычев, С. Ф. Ермаков, А. И. Королева, С. А. Воляник, В. В.

Авилов // Вестник машиностроения. – 2021. – № 1. – С. 64–66. – DOI 10.36652/0042-4633-2021-1-64-67.

187 Модифицированные присадками полифосфатов смазочные композиции «Пума» и «Буксол» / В. И. Колесников, М. А. Савенкова, В. В. Авилов, Ю. Ф. Мигаль // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2013. – № 2. – С. 3–8. – ISSN 1819-2092.

188 Эксплуатационные испытания и методы повышения износостойкости фрикционных узлов «пятник – подпятник» грузовых вагонов / В. В. Авилов, А. А. Сычев, А. П. Сычев, М. А. Савенкова // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2017. – С. 14–17.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Акты внедрения

ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДИРЕКЦИЯ ПО РЕМОНТУ ПУТИ

ЗАПАДНО-СИБИРСКАЯ ДИРЕКЦИЯ ПО РЕМОНТУ ПУТИ

ВАГОННОЕ РЕМОНТНОЕ ДЕПО ТАТАРСКАЯ

30 лет ВЛКСМ, 100
г. Татарск, 632120,
Тел./факс 58-252. (383-64-32-252)
E-mail: Sekretar-VChD-4@wsr.rzd

УТВЕРЖДАЮ:
Главный инженер
вагонного ремонтного
депо Татарская ВЧДР-4

_____А.Н.Плотников

АКТ
о внедрении результатов научных исследований

Настоящий акт составлен по итогам выполненных научных исследований, в результате которых сотрудниками кафедры «Теоретическая механика» и НИЦ НТ в ФГБОУ ВПО РГУПС к.ф.-м.н. доцентом А.П. Сычевым, к.т.н. И.В. Колесниковым и инженером В.В. Авиловым разработана технология модифицирования упорных и опорных поверхностей пятникового узла грузовых вагонов, основанная на нанесении наномодифицированного антифрикционного износостойкого смазочного состава.

Этот метод не приводит к фазовым превращениям основного металла и может осуществляться в полевых условиях и в атмосферной среде. Результаты лабораторных испытаний деталей модифицированных по указанной технологии показали повышение износостойкости трибосопряжений.

Для проведения предварительных испытаний было выбрано три грузовых вагона хоппер-дозатора, на которые установили надрессорные балки и пятники, модифицированные на основе разработанной технологии в

вагонном ремонтном депо Татарская ВЧДР-4 Западно-Сибирской дирекции по ремонту пути.

По состоянию на 18.09.2015г. пробег вагонов составляет 24000 км. Предварительные испытания будут продолжаться до достижения пробега в 160 000 км. В результате комиссионного осмотра 18.09.2015 рекомендована разработка технологического процесса для внедрения в технологию деповского ремонта в вагонном ремонтном депо Татарская ВЧДР-4 Западно-Сибирской дирекции по ремонту пути.

Вагонное ремонтное депо Татарская ВЧДР-4 Западно-Сибирской дирекции по ремонту пути отмечает высокий уровень исследований, благодаря которым достигнуто повышение долговечности и надежности пятникового узла грузовых вагонов.

Заместитель начальника депо по ремонту _____ С.В. Саглаев

Начальник технического отдела _____ С.Г. Ишков

Инженер-технолог _____ Н.С. Падерина

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе ФГБОУ ВО РГУПС, д.т.н., профессор

_____ А.Н. Гуда

«11» ____июля_____2025 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель начальника Вагонного ремонтного депо Батайск АО «Вагонная ремонтная компания – 1»

_____ С.М. Юдин

АКТ

на внедрение практических рекомендаций диссертационной работы соискателя В.В. Авилова

Мы, нижеподписавшиеся, от ВЧДр, Батайск АО «ВРК–1» старший мастер тележного участка Вершинин П.С., начальник технического отдела Токарев Д.А., от ФГБОУ ВО РГУПС научные руководители темы член корр. РАН, профессор Колесников И.В., к.ф.-м.н., доцент Сычев А.П., инженер Авилов В.В., составили настоящий акт о том, что Батайское вагонное депо приняло к внедрению рекомендации, по повышению износостойкости узла трения пятник-подпятник путем комбинированного метода модифицирования поверхности трения разработанные В.В. Авиловым. Комбинированный метод включает модификацию поверхности с применением электроискрового легирования и использования пластичных смазочных материалов, содержащих разработанные присадки.

Предлагаемая технология обработки поверхности подпятника, не нарушает технологию восстановления надрессорных балок грузовых вагонов, утвержденную ОАО «РЖД». Комбинированный метод повышения износостойкости позволяет снизить энергетические затраты и увеличить межремонтный интервал в процессе эксплуатации.

Для проведения предварительных испытаний было выбрано три грузовых вагона, на которые установили диски из стали 30ХГСА обработанные по предлагаемой технологии в надрессорные балки. В результате проведенного анализа износа, установлено, что износ пятника (опорной поверхности) уменьшился в 1,5 раза.

От ФГБОУ ВО РГУПС:

Зав. НИЛ НиНМ НИЧ д.т.н.,

чл.-корр. РАН _____ Колесников И.В.

к.ф.-м.н. доцент _____ Сычев А.П.

инженер _____ Авилов В.В.

От ВЧДр Батайск АО «ВРК–1»

Начальник технического отдела

_____ Токарев Д.А.

Старший мастер тележного участка _____ Вершинин П.С.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Варианты исполнения многофункциональной машины трения

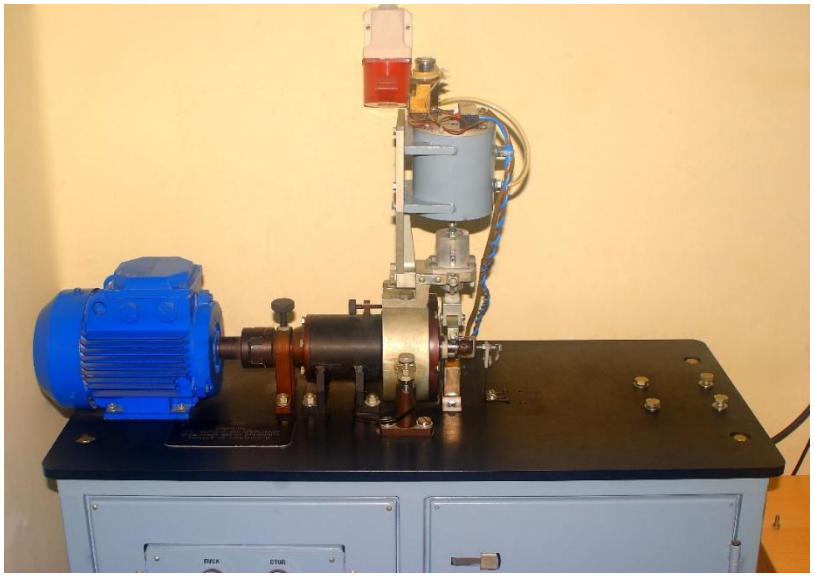


Рисунок П2.1 – Испытания при радиальной нагрузке

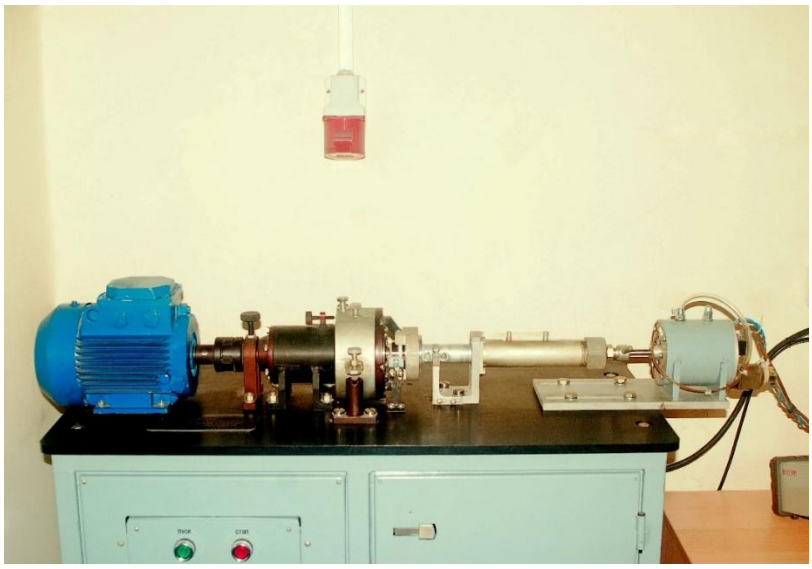


Рисунок П2.2 – Испытания при осевой нагрузке

Для создания динамической нагрузки в обеих схемах (рисунки П2.1, П2.2) применяется упругий элемент и катушка подмагничивания с магнитоприводом. Для реализации динамического нагружения применяется генератор звуковых колебаний с усилителем. Диапазон вибрационного воздействия лежит в пределах 0…3000 Гц.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Особенности трибологического узла многофункциональной машины трения для исследования электрических явлений на трибоконтакте

При изучении электрических явлений при сопряжении сухого, граничного или жидкостного трения главным условием является надежность изоляции узла трения от утечки трибозарядов. Для этого был разработан специальный узел трения с электрической изоляцией вала, на котором крепится испытуемый образец, а также электрическая изоляция контртел (рисунок П3.1).

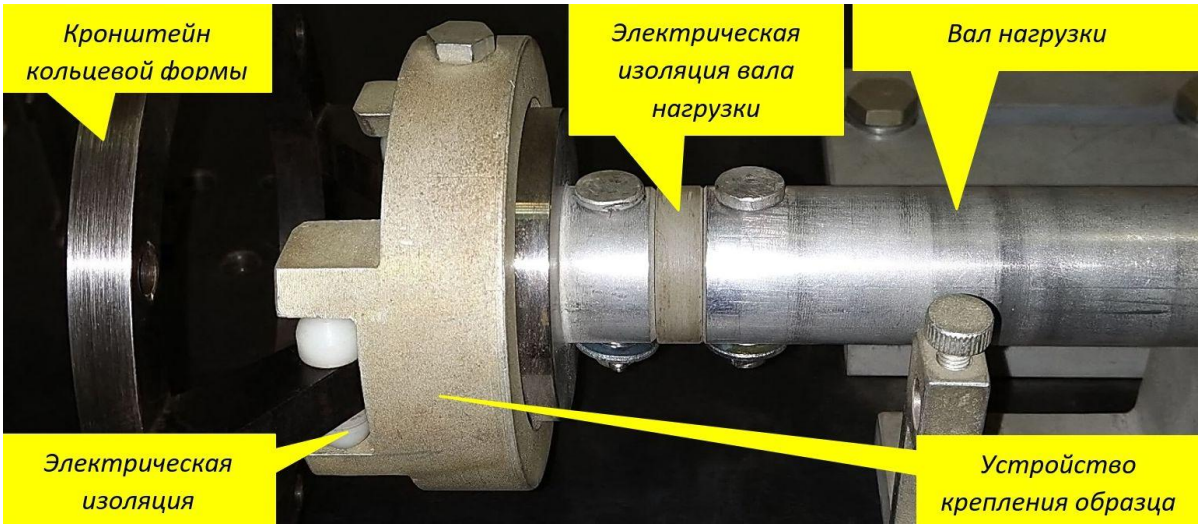


Рис. 1. Вал нагрузки с электрическими изоляторами

Исследованию электрических явлений для трибосопряжений при сухом трении посвящено много работ, а при наличии смазки – недостаточно. При наличии смазок, как отмечают исследователи, наблюдается переход ионов. При этом между контактирующими телами возникает разность потенциалов – трибоЭДС.

Разность потенциалов при трении с углеводородными смазками зависит от скорости перемещения, диэлектрических свойств смазки, присадок в ней. Для раскрытия механизма влияния электрических явлений на образование вторичных структур – пленок переноса, необходимы дальнейшие исследования.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Результаты испытаний смазочной композиции БУКСОЛ при нагрузке в 300 кН

Как было отмечено в главе 1, одним из основных элементов грузового вагона является «пятник – подпятник». В результате больших динамических нагрузок в этом трибосопряжении наблюдается большой износ. С целью выяснения эффективности работы данного трибосопряжения в случае применения разработанных присадок двойных метафосфатов в пластичных смазках нами проведены испытания при нагрузке в 300 кН. Результаты, представленные на рисунках П4.1–П4.4, показывают, что увеличение нагрузки до 300 кН не дает заметного увеличения износа.

Результаты испытаний смазочной композиции БУКСОЛ, измерение в контрольных точках по наружной стороне, приведены на рисунке П4.1.

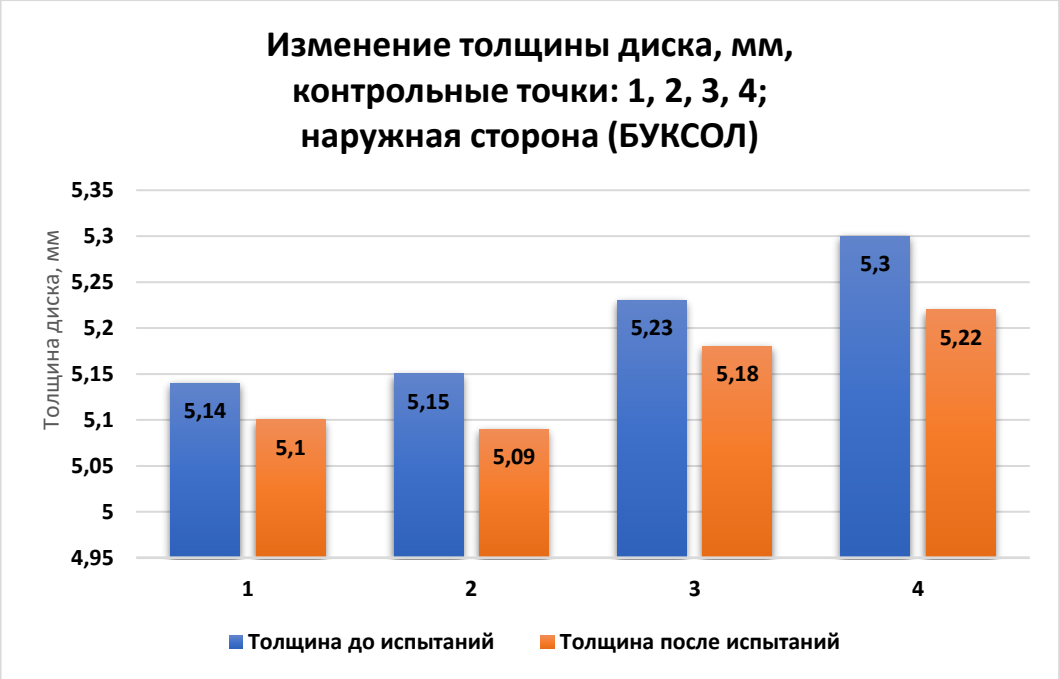


Рисунок П4.1 – Диаграмма изменения толщины диска до и после испытаний – смазка БУКСОЛ

Результаты испытаний смазочной композиции БУКСОЛ с присадкой $NiZn[(PO_3)_4]_\infty$, измерение в контрольных точках по наружной стороне, приведены на рисунке П4.2.

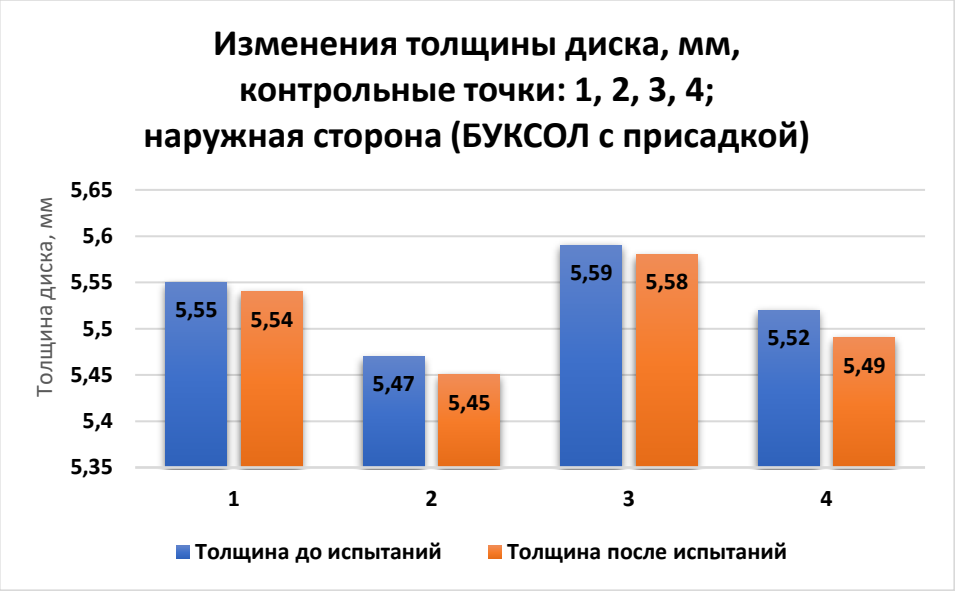


Рисунок П4.2 – Диаграмма изменения толщины диска до и после испытаний – смазка БУКСОЛ с присадкой

Результаты испытаний смазочной композиции БУКСОЛ, измерение в контрольных точках по внутренней стороне, приведены на рисунке П4.3.

Рисунок П4.3 – Диаграмма изменения толщины диска до и после испытаний – смазка БУКСОЛ

Результаты испытаний смазочной композиции БУКСОЛ с присадкой $NiZn[(PO_3)_4]_\infty$, измерение в контрольных точках по внутренней стороне, приведены на рисунке П4.4.

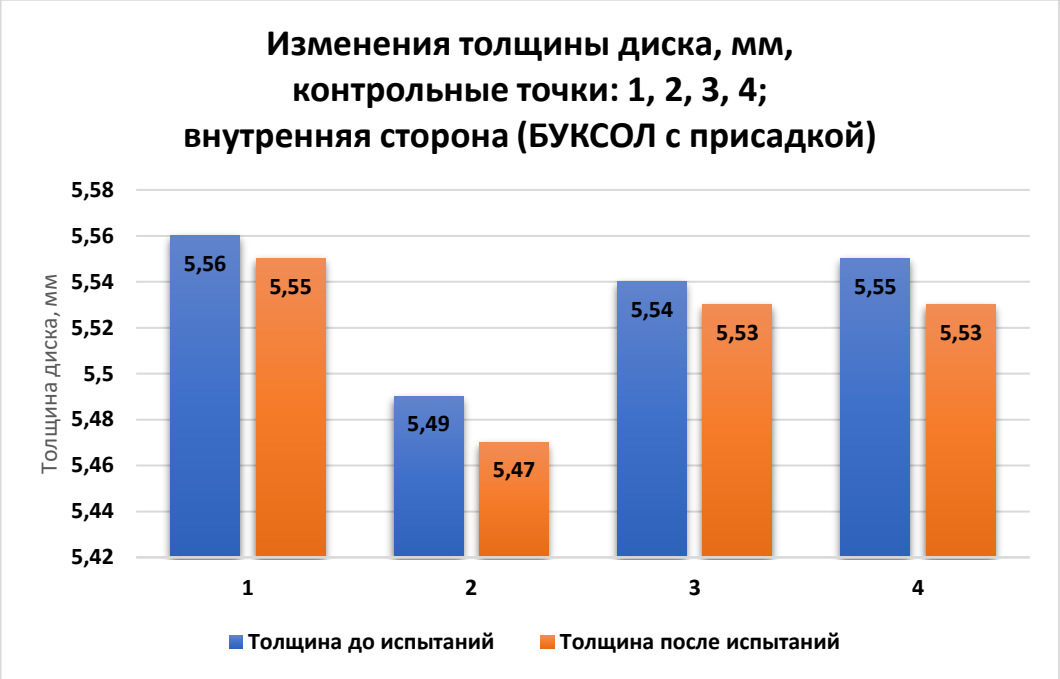


Рисунок П4.4 – Диаграмма изменения толщины диска до и после испытаний – смазка БУКСОЛ с присадкой

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Схема установки модифицирования поверхности подпятника

Установка с геометрическими размерами основных конструктивных элементов, устанавливающаяся в подпятник надрессорной балки, приведена на рисунке П5.1. Чертеж установки модифицирования поверхности трения УМТ-1 – на рисунке П5.2.

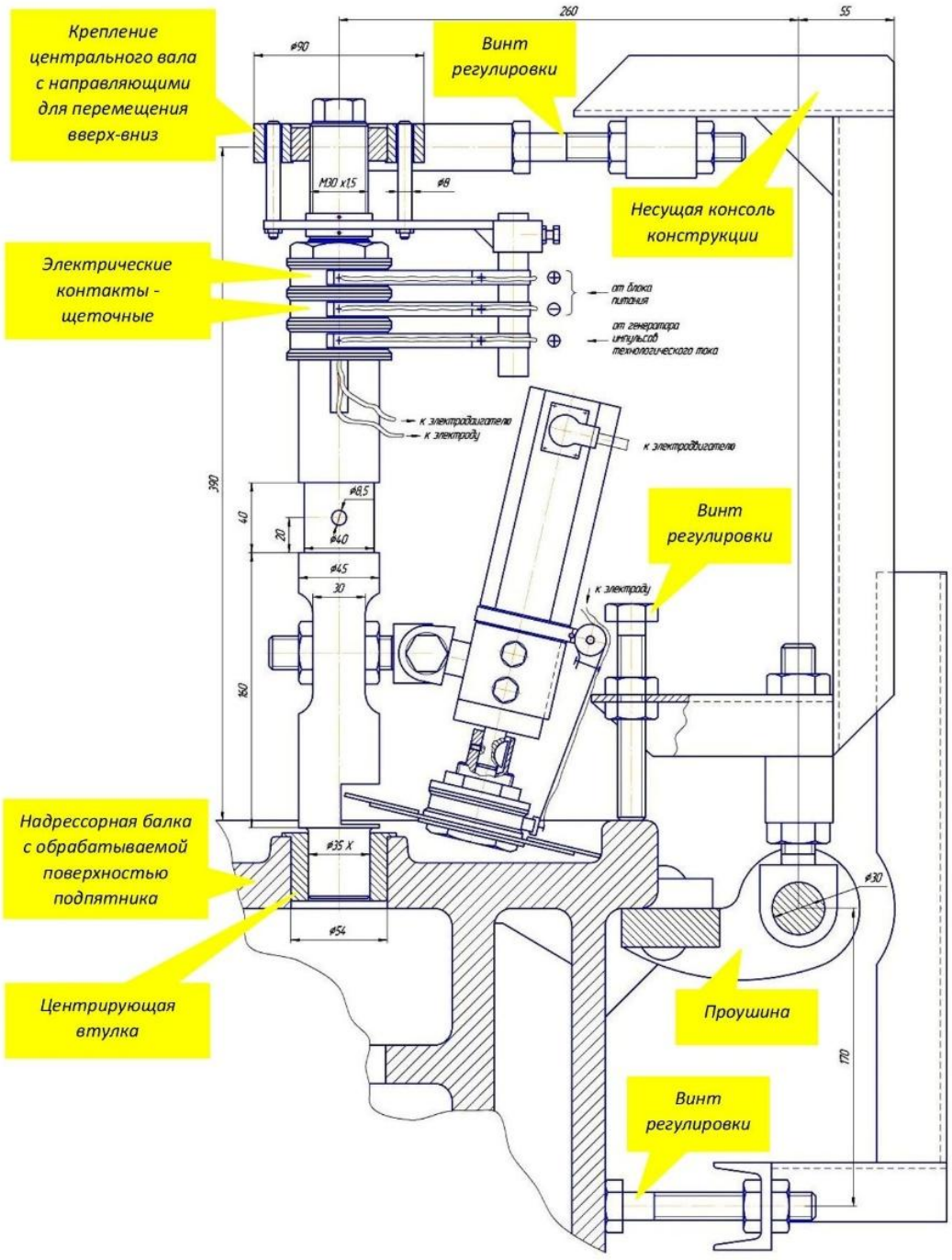


Рисунок П5.1 – Установка с основными размерами и конструктивными элементами

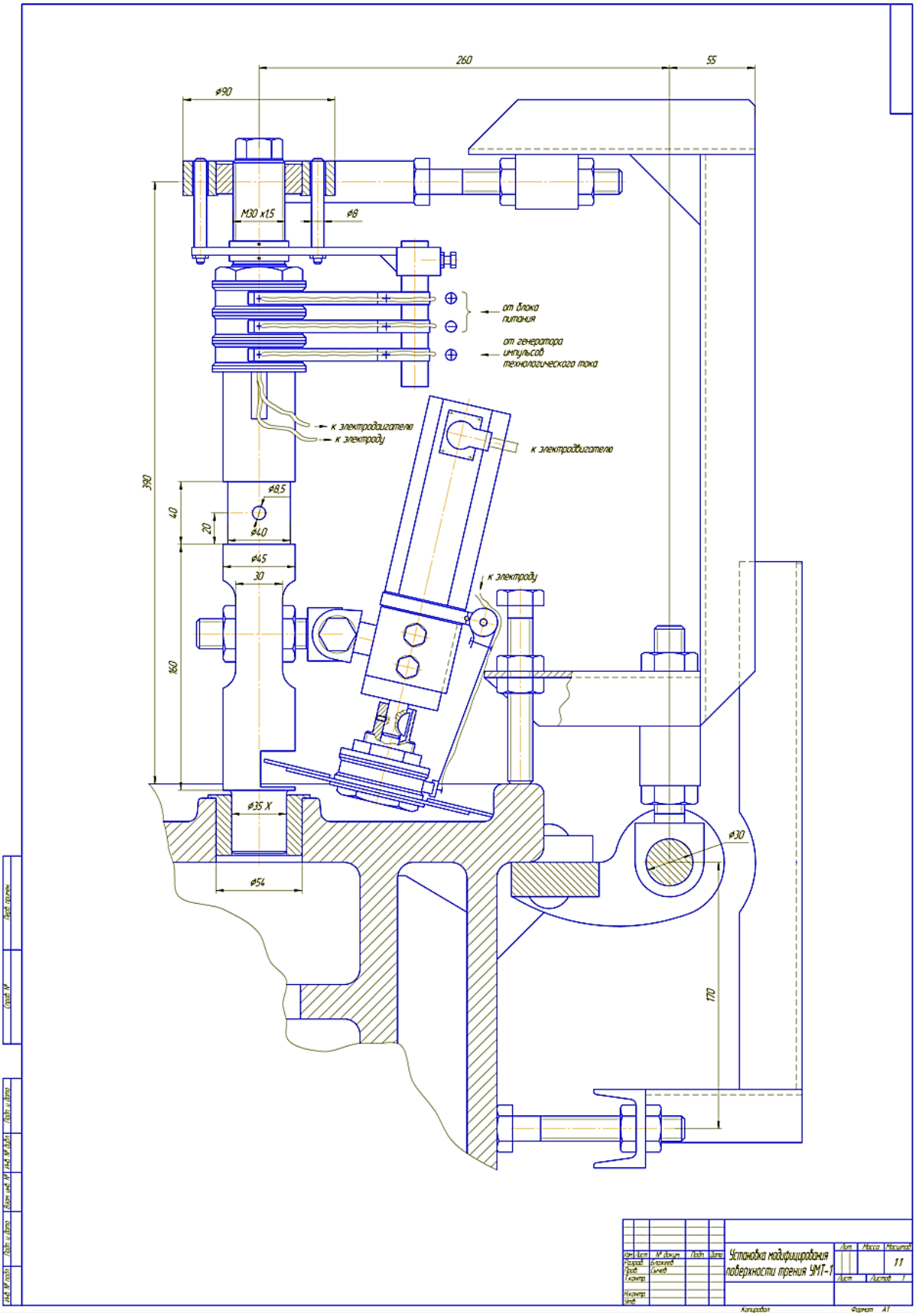


Рисунок П5.2 – Чертеж установки модифицирования поверхности трения УМТ-1