

На правах рукописи



Авилов Виктор Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ
ТРИБОСИСТЕМ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ
МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ**

Специальность 2.5.3. – Трение и износ в машинах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону
2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС)

Научный руководитель –

Колесников Игорь Владимирович – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, профессор РАН – ведущий научный сотрудник научно-образовательного центра «Нанотехнологии и новые материалы» НИЧ ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

Официальные оппоненты:

Буяновский Илья Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»

Бурлакова Виктория Эдуардовна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химия» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Ведущая организация –

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова» (ФГБОУ ВО ЮРГПУ (НПИ))

Защита состоится «22» декабря 2025 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 44.2.005.01 на базе ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» по адресу: 344038, Ростовская область, г. о. город Ростов-на-Дону, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2 (главный корпус, читальный зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2, и на сайте <http://www.rgups.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 44.2.005.01

доктор физико-математических наук, доцент

А. В. Сидашов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Холина, 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, A. 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, исключаящих 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 успешно его развивали Ю. К. Машков, Д. Н. Катаев в трудах по выяснению термодинамических подходов к управлению процессами ЭИЛ.

Объектом исследования выбран один из самых тяжело нагруженных 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 настоящего 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 $\text{CaZn}(\text{PO}_3)_4$ и $\text{NiZn}(\text{PO}_3)_4$ путем образования антифрикционных пленок на поверхности трения.

4 Результаты физико-механических и трибологических исследований смазочных материалов с присадками $\text{CaZn}(\text{PO}_3)_4$ и $\text{NiZn}(\text{PO}_3)_4$ 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 $\text{CaZn}(\text{PO}_3)_4$ и $\text{NiZn}(\text{PO}_3)_4$ 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 $\text{CaZn}(\text{PO}_3)_4$ и $\text{NiZn}(\text{PO}_3)_4$ показана эффективность присадок двойных метафосфатов к пластичным смазкам в повышении износостойкости 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 $\text{Fe}_\alpha(\text{W})$ и тем самым достигается упрочняющий эффект поверхности трибосопряжения.

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: «Трибология и надежность – 2009–2010» (Санкт-Петербург, 2009–2010 гг.); 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, получены 3 патента РФ. Общий объем 12,56 п.л., в том числе доля соискателя составила 6,61 п.л.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертационной работы дается обоснование актуальности исследования, представлена степень разработанности отечественными и зарубежными учеными целей и задач исследований по теме повышения износостойкости поверхностного слоя трибосопряжения. Подчеркивается необходимость повышения износостойкости путем изменения структуры и состояния поверхностного трибослоя, обладающего способностью приспосабливаться к изменяющимся условиям эксплуатации. Рассматривается перспективность исследований по повышению износостойкости тяжелонагруженных трибосистем путем приме-

нения комбинированного метода – модифицирования поверхности трения с помощью электроискрового легирования в жидких средах, исключающих образование окисной пленки и разработки эффективных присадок к пластичным смазочным материалам. Отмечается целесообразность синтеза технологий и материалов, позволяющих получить изменение структуры и состояния модифицированного трибослоя и образование вторичных структур – пленок переноса на поверхности трибоконтакта. Обозначены объект и предмет исследования, сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, степень достоверности результатов, а также содержатся сведения об апробации полученных результатов, структуре и объеме диссертации.

В первой главе описаны конструкция и особенности работы трибосопряжения «пятник – подпятник» подвижного состава и методы повышения его износостойкости. На основе проведенного анализа отечественных и зарубежных источников отмечено, что весьма актуальным является поиск научных и технических решений повышения износостойкости трибосопряжений, в данном случае «пятник – подпятник» грузового железнодорожного вагона, что, в свою очередь, ставит целый ряд вопросов и задач по эффективному выбору модифицирования поверхности трения, исключающего коррозию в условиях эксплуатации, и разработке эффективных смазочных материалов.

Приведено обоснование, что для повышения эффективности работы трибосопряжения «пятник – подпятник» в различных условиях и режимах эксплуатации необходимо реализовывать комбинированный метод модифицирования поверхности, обеспечивающий повышение износостойкости трибоконтакта путем упрочнения поверхности и устранения пленочного голодания пластичных смазочных материалов во фрикционной системе.

Во второй главе определены основные показатели по влиянию межэлектродной среды на физико-механические и трибологические характеристики покрытий, нанесенных методом электроискрового легирования. Состав поверхностного слоя существенно изменяется в зависимости от материалов применяемых электродов и параметров режимов при обработке поверхности.

Проведены металлографические, физико-механические и трибологические исследования характеристик образцов из стали 30X13 размером – длиной 40 мм и шириной 20 мм, модифицированных вольфрамовым электродом (FUBAG серии WP) в индустриальном масле И-40 и в полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-3, с разными параметрами импульсов (таблица 1): длительность (t , мкс), период (T , мкс).

Таблица 1 – Режимы обработки образцов

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

Проведен анализ влияния периода $T_{\text{имп}}$ и длительности импульса $t_{\text{имп}}$ на значение шероховатости. Так, при обработке в среде И-40: наибольшее значение средней шероховатости у образца № 8, $\bar{R}_a = 11,425$ мкм в режиме $T_{\text{имп}} = 1000$ мкс и $t_{\text{имп}} = 200$ мкс, а наименьшее – у образца № 2, $\bar{R}_a = 4,133$ мкм в режиме $T_{\text{имп}} = 4500$ мкс и $t_{\text{имп}} = 100$ мкс. При обработке в среде ПЭС-3 наибольшее значение средней шероховатости $\bar{R}_a = 8,853$ мкм у образца № 4, в режиме $T_{\text{имп}} = 1000$ мкс и $t_{\text{имп}} = 300$ мкс, а наименьшее у образца № 5, $\bar{R}_a = 5,181$ мкм в режиме $T_{\text{имп}} = 2750$ мкс и $t_{\text{имп}} = 200$ мкс.

Металлографические исследования микроструктуры белого слоя поверхности (рисунок 1) в среде И-40 и в среде ПЭС-3 позволяют сделать вывод, что образование новых фаз и переходных структур при электроискровом легировании связано с температурой нагрева и скоростью охлаждения, которыми сопровождается процесс обработки, вследствие разных теплофизических свойств жидкостей.

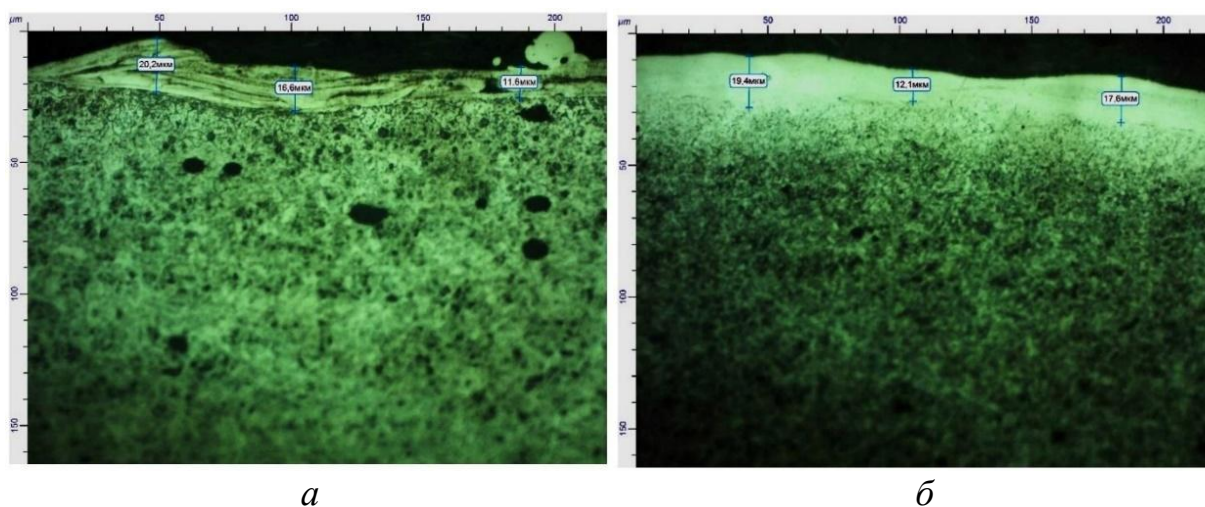


Рисунок 1 – Микроструктура поверхности, модифицированной путем ЭИЛ в среде И-40 (а) и в среде ПЭС (б)

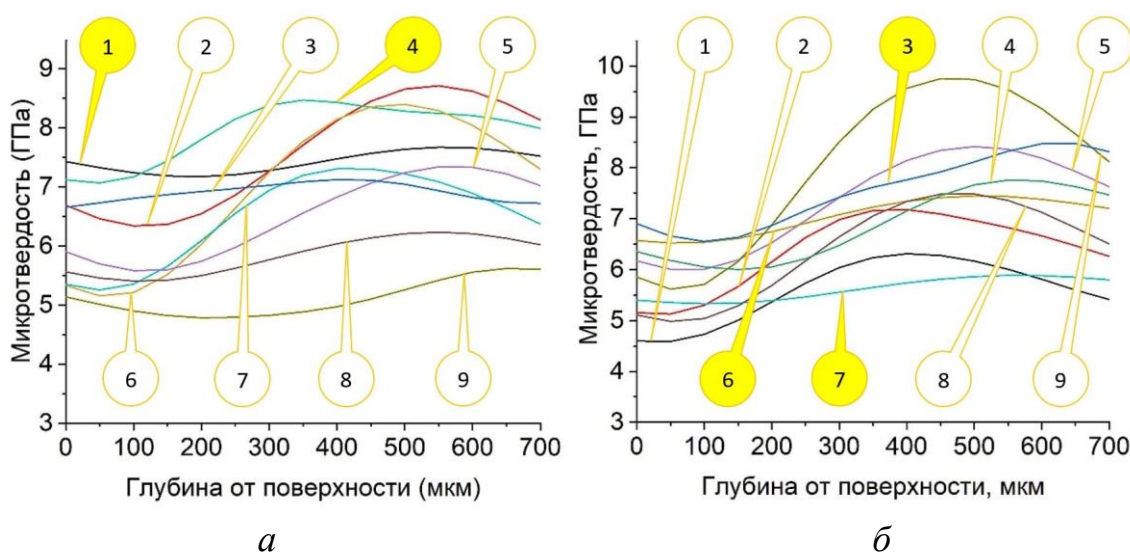


Рисунок 2 – Значения микротвердости образцов, модифицированных ЭИЛ в среде И-40 (а) и в среде ПЭС (б)

На рисунке 2 приведен анализ результатов измерения микротвердости образцов, поверхность которых обработана электроискровым легированием в жидких средах. Из рисунка видно, что практически у всех образцов наблюдается разупрочнение приповерхностного слоя, который находится в зоне термического влияния от действия ЭИЛ. Можно сделать вывод, что обработка в среде И-40 приводит к более высоким значениям микротвердости в граничных слоях приповерхностного слоя.

Трибологические испытания проводились по схеме «ролик – пластина» на машине трения СМТ. Удельная интенсивность изнашивания определялась по глубине и ширине лунок износа – 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. Длительность испытаний осуществлялась в течение 8 часов при нагрузке на узел трения в 800 Н.

Параметром износостойкости является глубина лунки износа h , которая определялась 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. Результаты трибологических испытаний представлены на рисунке 3.

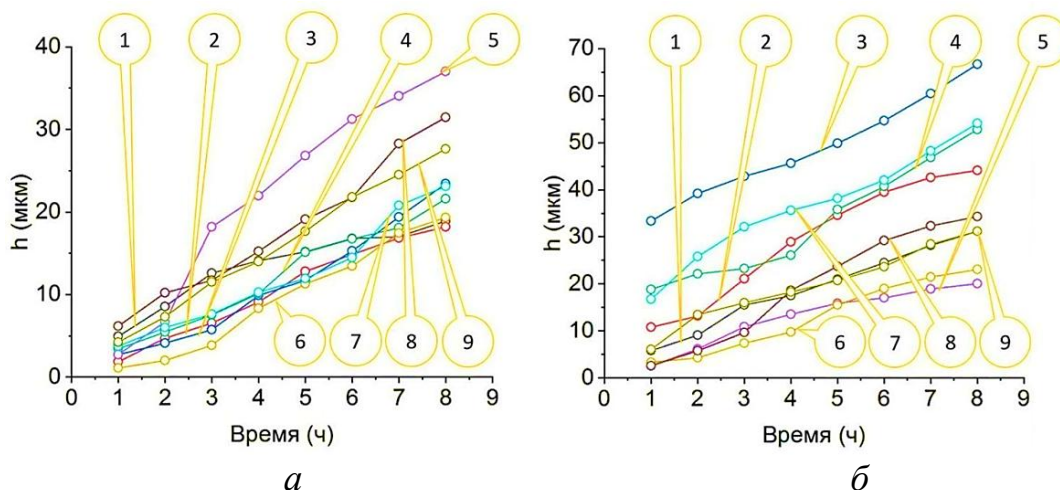


Рисунок 3 – Изменение величины износа во времени колодки, модифицированной ЭИЛ в средах:
а – в среде И-40; б – в среде ПЭС-3

Износостойкость образцов, модифицированных в углеводородной среде, оказалась значительно выше, чем при обработке в полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-3. При этом минимальный износ продемонстрировали образцы, мо-

дифицированные в среде И-40 при длительности импульсов $t_{\text{имп}} = 100$ мкс, а образцы, модифицированные в среде ПЭС-3 при длительности импульсов $t_{\text{имп}} = 200$ мкс.

В третьей главе проведены исследования морфологии, элементного состава поверхности, а также с применением квантовохимических расчетов изучено влияние диффузионных процессов в зоне трения.

На рисунках 4 и 5 представлены результаты, полученные на растровом электронном микроскопе, по содержанию вольфрама – W, ат. % и углерода – C, ат. % в образцах, модифицированных электроискровым легированием в средах И-40 и ПЭС-3, из которых видно, что содержание вольфрама и углерода в образцах, модифицированных ЭИЛ в среде И-40 выше, чем в среде ПЭС-3.

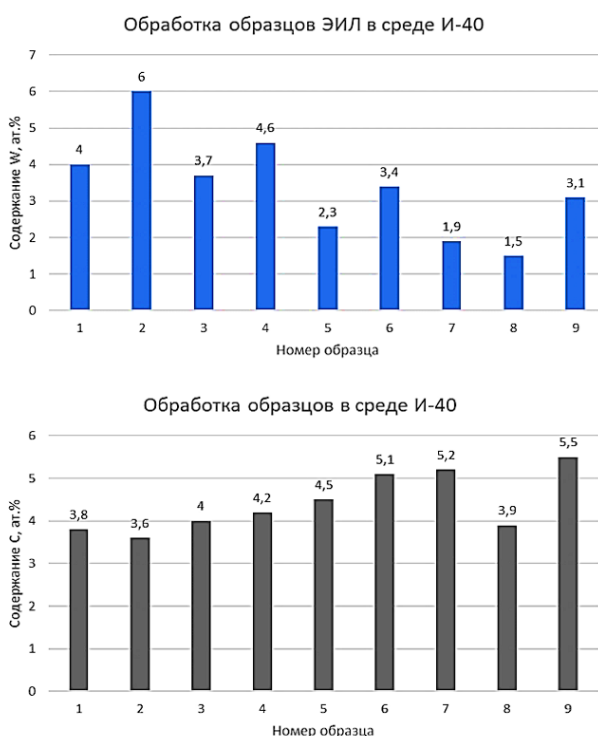


Рисунок 4 – Содержание вольфрама и углерода в образцах, модифицированных ЭИЛ в среде И-40

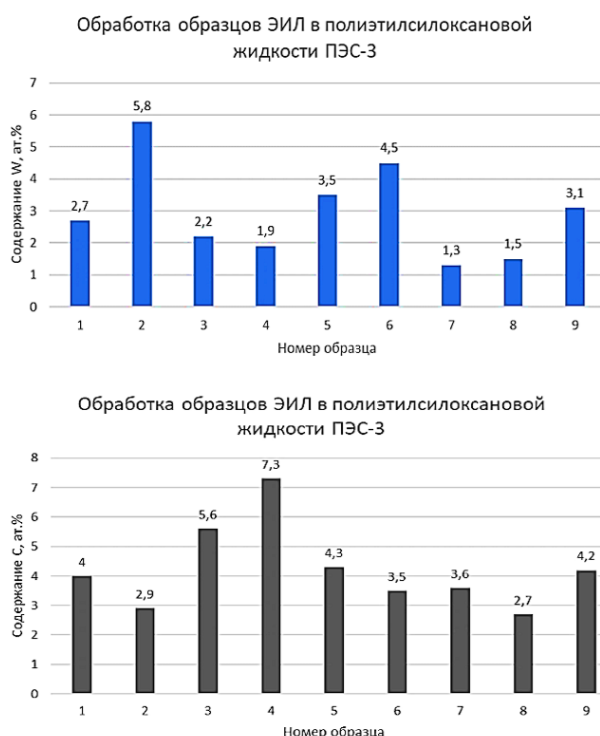


Рисунок 5 – Содержание вольфрама и углерода в образцах, модифицированных ЭИЛ в среде ПЭС-3

Для выяснения механизма формирования в поверхностном слое упрочняющих структур, способствующих повышению износостойкости, методом РФЭС на приборе SPECS были проведены исследования химического состава и химической связи (рисунок 6). Анализ спектров показывает, что в состав поверхности входят железо, кислород, углерод и вольфрам. Интенсивность углерода в поверхности образца в углеводородной среде И-40, выше, чем в среде ПЭС-3. Энергетическое положение линии 4f-уровня позволяет определить связь вольфрама с углеродом, что способствует упрочнению поверхностного слоя за счет образования фрагмента – WC.

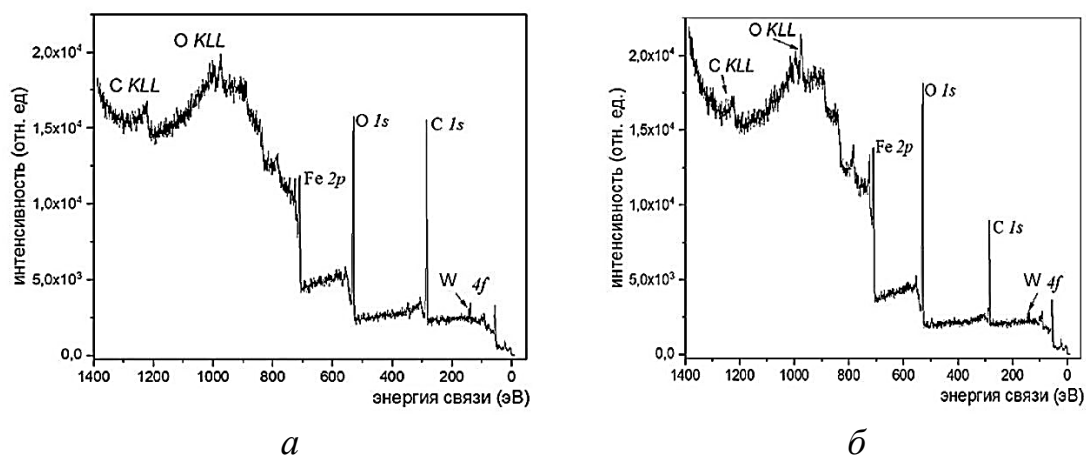


Рисунок 6 – Рентгеноэлектронный спектр поверхности после трения образца № 2, работающего в среде И-40 (а), в среде ПЭС-3 (б)

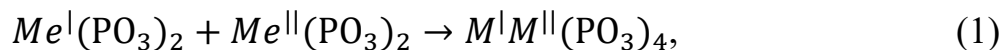
Для доказательства сделанных выводов проведен численный расчет энергии связи атомов W и C с атомами железа. Используя квантово-химический расчет методом DFT (Density Functional Theory), определили энергию распада (в эВ) кластера, моделируемого 11-слойной периодической пластиной, как наиболее приближенной к реальной границе трибоповерхности, состоящей из пяти нижних и пяти верхних слоев атомов железа, а между ними – адсорбированные атомы C или W. Будем называть этот кластер сегрегационным, и его энергия связи $E_c = -132,9$ эВ при наличии углерода C, для вольфрама $E_c = -133,4$ эВ. В результате трения этот кластер распадается на два – «чистое железо Fe» с энергией $E_{ж} = -85,5$ эВ и кластер – «железо с атомами C или W», называемый адсорбционным. Энергия связи адсорбционного кластера C с железом составляет $E_a = -45,2$ эВ, а энергия адсорбционного кластера W с железом $E_a = -45,1$ эВ. В результате находим энергию распада E_p исходного (сегрегационного) кластера:

$$E_p = |E_c - E_a - E_{ж}|.$$

Энергия E_p в случае наличия в кластере углерода составляет $E_p = 2,2$ эВ, а в случае вольфрама $E_p = 2,8$ эВ, а для атомов железа $E_a = -45,7$ эВ, а $E_p = 1,7$ эВ

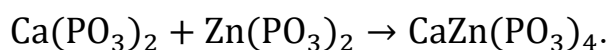
Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что атомы вольфрама W и углерода C имеют энергию связи с железом больше, чем у самого железа Fe–Fe, и могут служить упрочняющими поверхность трения добавками, повышая износостойкость трибосистемы.

В четвертой главе представлен синтез нового вида присадок – двойных метафосфатов, молекулы которых имеют линейную структуру (рис. 7):



где Me^I – атомы Ca или Ni; Me^{II} – атомы Zn или Co

В случае с атомами Ca и Zn формула (1) приобретает вид:



Идентификацию молекул – структуры и реакционной способности – полученных соединений, осуществляли с помощью квантово-химических расчетов программного комплекса ADF (Amsterdam Density Functional).

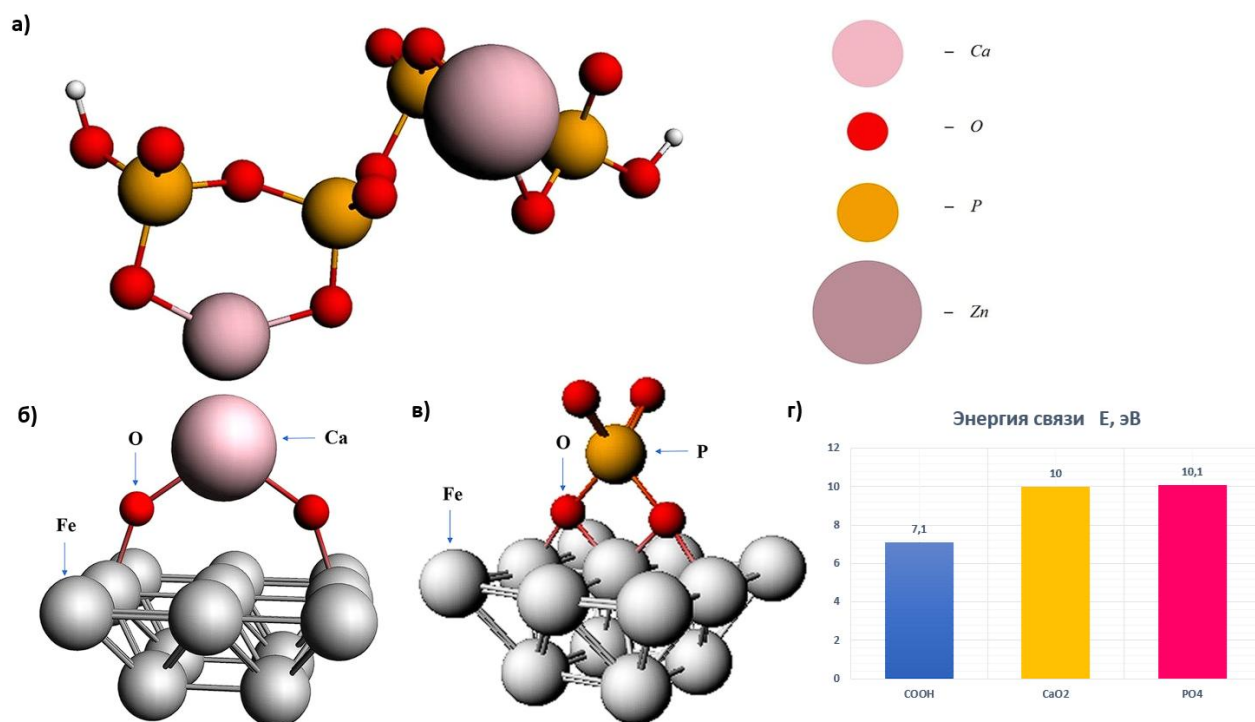


Рисунок 7 – Характеристика молекулы присадки:

а – структура молекулы присадки $\text{CaZn}[(\text{PO}_3)_4]_\infty$; *б* – энергия связи железа с фрагментом катиона; *в* – то же с фрагментом аниона; *г* – сравнение значений энергии связи с железом присадки и высших жирных кислот

Проведены квантово-химические расчеты энергии связи фрагментов данной молекулы с поверхностью металла – кластерами железа, состоящими из 13 атомов (рисунок 7, *а* и *б*). Сравнение энергий связи данной молекулы и высших жирных кислот (группа $-\text{COOH}-$) с железом показывает эффективность предложенной присадки (рисунок 7, *в*).

С целью подтверждения полученных результатов проведены исследования физико-химических и трибологических характеристик смазочных композиций ПУМА и БУКСОЛ, с введением в количестве 1 масс. % присадок $\text{CaZn}(\text{PO}_3)_4$ и $\text{NiZn}(\text{PO}_3)_4$. В результате исследований было отмечено улучшение физико-химических и трибологических свойств смазочных композиций с присадками:

- износостойкость увеличивается более чем 20 %;
- температура каплепадения увеличивается в среднем более чем 15 %;
- коллоидная стабильность улучшается в среднем на 8 %.

Для оценки влияния нагрузочно-скоростных режимов и процентного содержания присадки на износостойкость трибосопряжения использован метод планирования эксперимента.

В соответствии с матрицей ортогонального центрального композиционного плана второго порядка для каждого цикла испытаний выбиралась постоянная нагрузка в зоне контакта 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 «пятник – подпятник». Для измерения ширины l лунки износа (рисунок 8) осуществлялось размыкание трибопары с периодичностью в 60 мин, с последующим вычислением глубины изношенного слоя h .

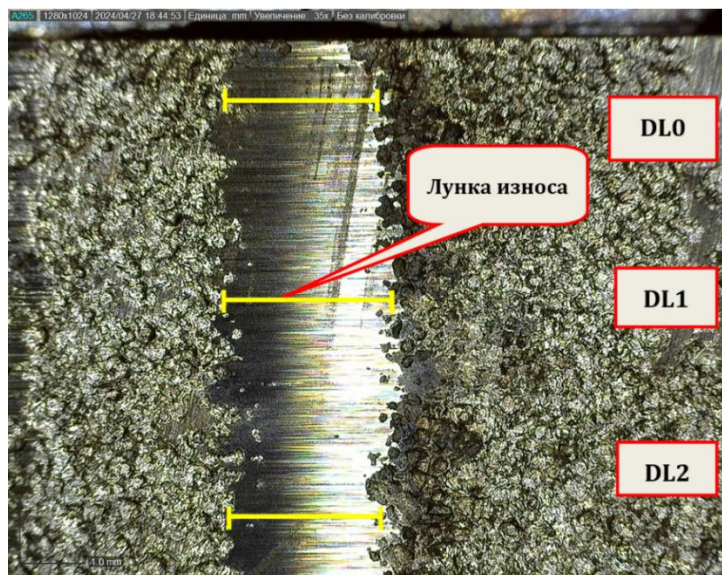


Рисунок 8 – Износ пластины (увеличение $\times 35x$)

Проведены сравнительные трибологические испытания образцов, прошедших обработку электроискровым легированием со смазочным материалом, ПУМА-МР с присадкой (таблица 2) и без присадки.

Таблица 2 – Варьируемые факторы в кодовых и натуральных значениях

ЭИЛ, смазочный материал ПУМА-МР с присадкой, рисунки 9-11						
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

Результаты трибологических испытаний показали положительное влияние присадки на износостойкость, а использование метода планирования эксперимента позволило получить математическую регрессионную модель влияния процентного содержания присадки и нагрузочно-скоростных условий эксплуатации рассматриваемого трибосопряжения на величину износа I , мкм.

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

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

На рисунках 9 – 11 представлена геометрическая интерпретация полученной математической модели влияния процентного содержания присадки и нагрузочно-скоростных условий эксплуатации фрикционной подсистемы «ролик – пластина» на величину износа I , мкм.

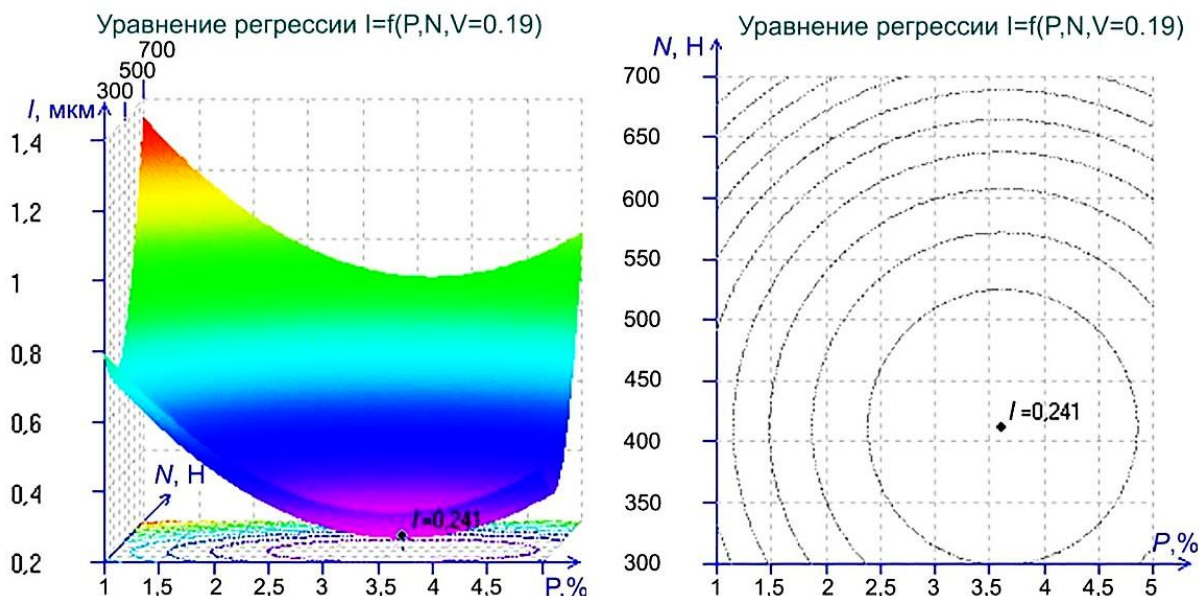


Рисунок 9 – Геометрическая интерпретация уравнения регрессии по влиянию процентного содержания P присадки двойного метафосфата кальция и цинка и нагрузки N на выходной параметр оптимизации (глубина лунки износа) I , мкм, при фиксированной скорости

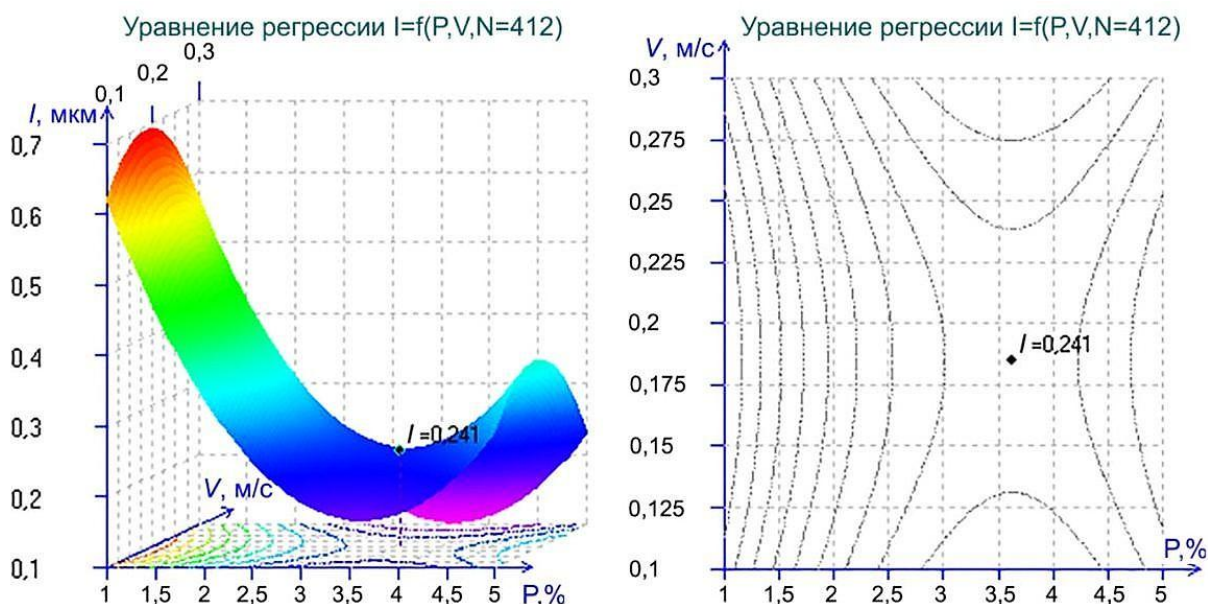


Рисунок 10 – Геометрическая интерпретация уравнения регрессии по влиянию процентного содержания P присадки двойного метафосфата кальция и цинка и скорости относительного скольжения V на выходной параметр оптимизации (глубина лунки износа) I , мкм, при фиксированной нагрузке

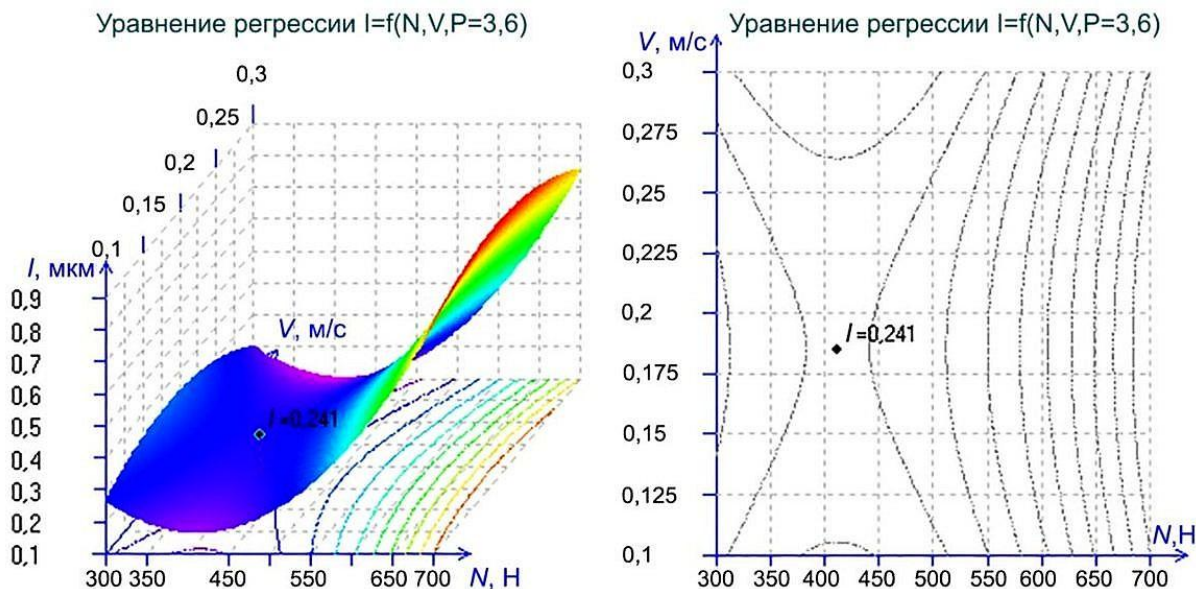


Рисунок 11 – Геометрическая интерпретация уравнения регрессии по влиянию нагрузки N и скорости относительного скольжения V на глубину лунки износа I , мкм, при фиксированном процентном содержании присадки двойного метафосфата кальция и цинка P

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 влияние оказывает нагрузка.

В пятой главе представлены стендовые и эксплуатационные испытания трибологических характеристик материалов «пятник – подпятник» подвижного состава. Для проведения испытаний использовались пластичные смазочные материалы ПУМА и БУКСОЛ без присадки и с разработанной присадкой $\text{NiZn}[(\text{PO}_3)_4]_\infty$. Испытания проводились на модельном стенде, имитирующем работу фрикционного узла «пятник – подпятник» грузового вагона с реальными эксплуатационными нагрузками на трибоспряжение и относительной скоростью перемещения пятникового узла относительно надрессорной балки (рисунок 12).



Рисунок 12 – Общий вид модельного стенда:

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

Стенд представляет собой сварную конструкцию 4, включающую 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.

В надрессорную балку грузового вагона был помещен диск из стали 30ХГСА, на который предварительно наносили пластичные смазочные материалы ПУМА-МЛ и БУКСОЛ.

По окончании каждого испытания проводились измерения величины износа диска, в контрольных точках по наружной и внутренней части диска в двух взаимно перпендикулярных направлениях в плоскости действия силы нагрузки.

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 (рисунок 13 – 16).

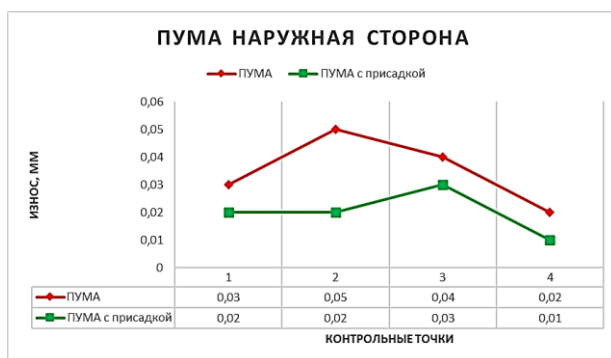


Рисунок 13 – Износ наружной стороны диска со смазкой ПУМА и ПУМА с присадкой

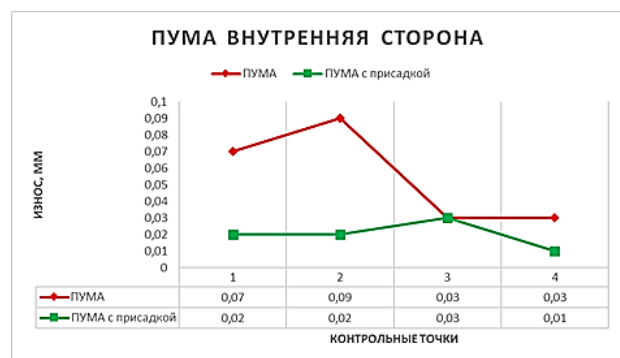


Рисунок 14 – Износ внутренней стороны диска со смазкой ПУМА и ПУМА с присадкой

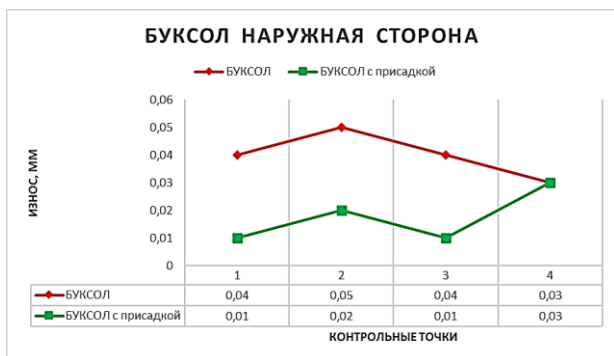


Рисунок 15 – Износ наружной стороны диска со смазкой БУКСОЛ и БУКСОЛ с присадкой

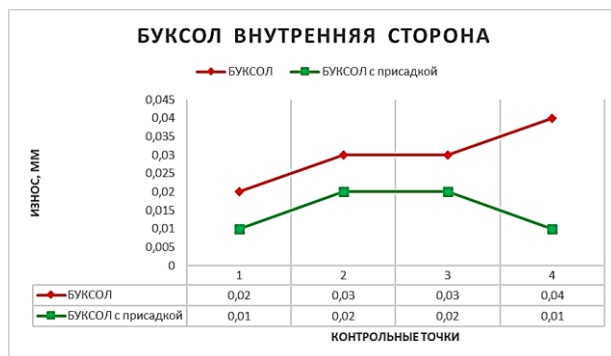


Рисунок 16 – Износ внутренней стороны диска со смазкой БУКСОЛ и БУКСОЛ с присадкой

Приведенные результаты показывают, что при испытании смазочных композиций с присадкой $\text{NiZn}[(\text{PO}_3)_4]_\infty$ износ диска меньше по сравнению с базовым смазочным материалом.

Эксплуатационные испытания включали в себя комбинированный метод. Технология обработки внутренней поверхности наружного буртика подпятника электроискровым легированием была апробирована на Западно-Сибирской железной дороге в вагоноремонтном депо г. Татарск Новосибирской области. В качестве смазочного материала применялась ПУМА с присадкой двойного метафосфата $\text{CaCo}[(\text{PO}_3)_4]_\infty$, по свойствам аналогичная присадке $\text{CaZn}[(\text{PO}_3)_4]_\infty$ и $\text{NiZn}[(\text{PO}_3)_4]_\infty$.

Результаты эксплуатационных испытаний показали практическое отсутствие изнашивания внутренней обработанной поверхности наружного буртика подпятника, а сопряженная с ним поверхность пятника имела незначительный износ.

Для оценки динамического влияния на износостойкость трибосопряжений, при радиальных и торцевых нагрузках применялась разработанная нами многофункциональная машина трения (патент RU 2624992).

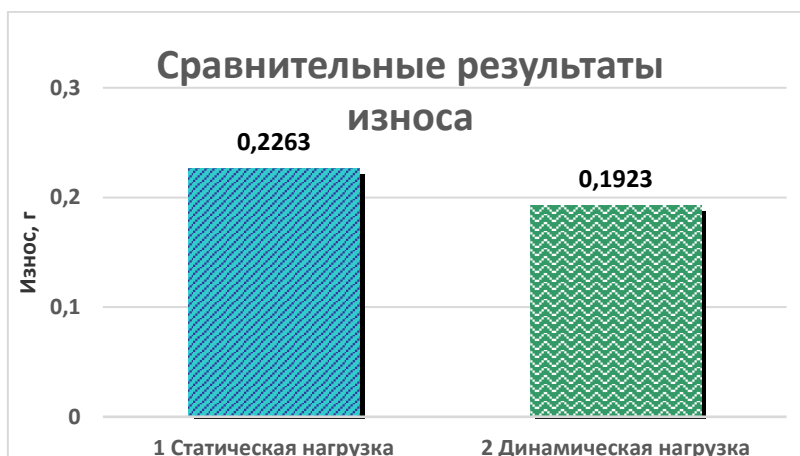


Рисунок 17 – Сравнительные результаты износа при статическом (1) и при динамическом (2) режиме: скорость $V = 0,185$ м/с, нагрузка $N = 411,8$ Н, процентное содержание присадки $P = 3,6$ %

В результате проведенных сравнительных испытаний при статических и динамических нагрузках (рисунок 17) показано, что интенсивность изнашивания уменьшается при динамическом режиме на 15%.

ОБЩИЕ ВЫВОодЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Общие выводы

1 Предложена методика и разработана технология модифицирования поверхности трения на основе метода электроискровой обработки поверхности в жидких средах, что позволило увеличить твердость 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 $\text{CaZn}[(\text{PO}_3)_4]_\infty$ с поверхностью металла – кластерами железа, состоящими из 13 атомов, позволили установить, что энергия связи данной молекулы составляет для фрагментов $\text{CaO}_2 = 10$ эВ, для $\text{PO}_4 = 10,1$ эВ, а энергия связи высших жирных кислот (группа $-\text{COOH}-$) 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 $\text{Fe}_\alpha(\text{W})$ и тем самым достигается упрочняющий эффект поверхности трибосопряжения.

5 Лабораторные трибологические испытания смазочных материалов с присадками двойных метафосфатов $\text{CaZn}[(\text{PO}_3)_4]_\infty$ увеличивают износостойкость более чем на 20 %. Результаты стендовых испытаний смазочных материалов с присадкой $\text{NiZn}[(\text{PO}_3)_4]_\infty$ подтвердили повышение износостойкости более чем на 25 %.

6 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 тяжело нагруженных 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.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ

1 **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.

2 Тетраметафосфат магния-марганца — многофункциональная присадка к пластичным смазкам / М. А. Савенкова, А. И. Савенкова, С. А. Воляник, **В. В. Авилов** // Вестник Евразийской науки. – 2024. – Т. 16, № 4. – ISSN 2588-0101.

3 Влияние сложных эфиров, используемых в качестве межэлектродной среды, на структуру и свойства модифицированных методом электроискрового легирования поверхностей трения / П. Г. Иваночкин, Д. С. Мантуров, С. А. Данильченко, **В. В. Авилов**, А. И. Азоян // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4 (92). – С. 16–24. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_16.

4 Эффективная полимерная фосфоромолибдатная присадка для смазочных материалов / М. А. Савенкова, С. А. Воляник, А. П. Сычев, **В. В. Авилов**, П. Г. Иваночкин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (90). – С. 172–179. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_172.

5 Исследование влияния межэлектродной среды на результаты обработки стальной поверхности методом электроискрового легирования / А. В. Сидашов, П. Г. Иваночкин, С. А. Данильченко, Д. С. Мантуров, И. В. Колесников, **В. В. Авилов** // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4 (88). – С. 59–65. – DOI 10.46973/0201-727X2022459.

6 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.

7 Неорганическая полимерная присадка к пластичным смазочным материалам / И. В. Колесников, М. А. Савенкова, А. П. Сычев, **В. В. Авилов**, С. А. Воляник, И. Н. Ковалева // Трение и износ. – 2021. – Т. 42. – № 5. – С. 532–538. – DOI 10.32864/0202-4977-2021-42-5-532-538.

8 Повышение трибологических характеристик пластичных смазок при введении присадок на основе нестехиометрических соединений молибдена и вольфрама / К. И. Карпенко, Н. А. Мясникова, Ф. В. Мясников, **В. В. Авилов** // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2020. – № 1. – С. 20–23. – ISSN 0202-3350.

9 Повышение трибологических характеристик смазочных материалов введением присадки фосфоровольфрамата цинка / М. А. Савенкова, С. А. Воляник, В. П. Шехов, **В. В. Авилов**, А. П. Сычев, А. И. Королева // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2020. – № 9. – С. 415–418. – DOI 10.36652/0202-3350-2020-21-9-415-418.

10 Фосфоромолибдат натрия – полимерная присадка для железнодорожных смазок / **В. В. Авилов**, Е. И. Лунева, С. А. Воляник, М. А. Савенкова, А. П. Сычев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2019. – № 11. – С. 493–495. – ISSN 0202-3350.

11 Влияние физико-химических свойств фосфоромолибдатов на трибологические характеристики смазок / В. И. Колесников, Ермаков С.Ф., Воляник С.А., Лунева Е.И., **В.В. Авилов**, Сычев А.П., Савенкова М.А. // Трение и износ. – 2019. – Т. 40. – № 5. – С. 574–580.

12 Пути повышения износостойкости тяжело нагруженных узлов трения / В. И. Колесников / **В. В. Авилов**, М. А. Савенкова, С. А. Воляник, А. П. Сычев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 2 (70). – С. 8–15. – ISSN 0201-727X.

13 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.

14 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.

15 Модифицированные присадками полифосфатов смазочные композиции «Пума» и «Буксол» / В. И. Колесников, М. А. Савенкова, Д. Н. Шишияну, **В. В. Авилов**, Ю. Ф. Мигаль // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2013. – № 2. – С. 001–007. – ISSN 1819-2092.

16 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.

17 Improving lubricants by adding inorganic polymers / I. V. Kolesnikov, M. A. Savenkova, S. A. Volyanik, **V. V. Avilov**, A. P. Sychev, S. F. Ermakov, A. I. Koroleva // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41, No. 4. – P. 329–332.

18 Improvement of the tribological properties of heavy-loaded friction units “centre block-footstep bearing” of a freight car / A. Sychev, **V. Avilov**, M. Savenkova, E. Luneva // Journal of Physics: Conference Series. Ser. “Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, ITMM 2021 – Mathematical Modeling and Computational Methods in Problems of Electromagnetism, Electronics and Physics of Welding” – 2021. – Article no. 052033.

19 Introduction of innovative technologies in friction units of heavy-duty tribosystems and monitoring of their condition / I. Kolesnikov, P. Koropets, **V. Avilov** // Journal of Physics: Conference Series. Ser. “Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, ITMM 2021- Mathematical Modeling and Computational Methods in Problems of Electromagnetism, Electronics and Physics of Welding”. – 2021. – Article no. 052034.

20 Improvement of the wear resistance and energy efficiency of heavy-loaded metal-polymer transport tribosystems / I. Kolesnikov, V. Osipov, V. Kolesnikov, V. Guzun, **V. Avilov** // Journal of Physics: Conference Series. Ser. “Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, ITMM 2021- Mathematical Modeling and Computational Methods in Problems of Electromagnetism, Electronics and Physics of Welding”. – 2021. – Article no. 052036.

Патенты:

21 **Патент RU 2845846** Пластичная биоразлагаемая смазка для железнодорожной техники / В. В. Колесников, П. Д. Мотренко, С.А. Задорин, В.Д. Верескун, В. И. Колесников, А.П. Сычев, Е.С. Новиков, Д.С. Мантуров, А.А. Бичеров, А.М. Ананко, А.И. Воропаев, **В.В. АВИЛОВ**. – №2024112759; заявл. 08.05.2024; опубл. 26.08.2025.

22 **Патент RU 2624992** Многофункциональная машина трения (варианты) / В. И. Колесников, П. Д. Мотренко, В. В. Колесников, **В. В. АВИЛОВ**, И. В. Колесников. – № 2015133559; заявл. 10.08.2015; опубл. 11.07.2017.

23 **Патент RU 21198** Пластичная смазка / В. И. Колесников, А. П. Сычев, А. В. Лапицкий, П. А. Кармазин, **В. В. АВИЛОВ**, Е. И. Лунева. – № 201300712; заявл. 15.07.2013; опубл. 2015.

Публикации в других изданиях:

24 Исследование модифицированной поверхности, полученной методом электроискрового легирования в жидких сложноэфирных средах на формирование пленок трения / Д. С. Мантуров, А. В. Сидашов, П. Г. Иваночкин, **В. В. АВИЛОВ**, К. О. Галась // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4 (65). – С. 63–70. – ISSN 1818-5509.

25 Исследование износостойкости стали 30х после электроискрового легирования в жидких средах / Д. С. Мантуров, **В. В. АВИЛОВ**, П. Г. Иваночкин,

А. И. Воропаев, К. О. Галась // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4 (61). – С. 77–83. – ISSN 1818-5509.

26 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.

27 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.

28 **Авилов, В. В.** Эксплуатационные испытания и методы повышения износостойкости фрикционных узлов «пятник – подпятник» грузовых вагонов / В. В. Авилов, А. А. Сычев // Транспорт: наука, образование, производство: труды Международной научно-практической конференции. Т. 2. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2016. – С. 157–159. – ISBN 978-5-88814-446-6.

29 Исследование совместного действия фосфоромолибдатов и жидкокристаллических соединений холестерина на смазочные свойства масел / **В. В. Авилов**, Н. А. Мясникова, М. А. Савенкова, С. А. Воляник // Транспорт: наука, образование, производство: труды Международной научно-практической конференции. Т. 4 : Технические и естественные науки. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2016. – С. 193–195. – ISBN 978-5-88814-448-0.

30 **Авилов, В. В.** Трибологические испытания пластичной смазочной композиции БУКСОЛ, с новой полимерной присадкой – конденсированным фосфатом никеля-цинка / В. В. Авилов // Теоретические и практические аспекты современной науки : сборник научных статей по итогам Международной научно-практической конференции, 20–21 октября 2016 г. – Санкт-Петербург: КультИнформПресс. – 2016. – С. 36–39. – ISBN 978-5-8392-0618-2.

31 Трибологическое исследование смазочных масел с присадкой фосфоромолибдата кобальта / Е. И. Лунева, **В. В. Авилов**, М. А. Савенкова, Н. А. Мясникова // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт-2015». – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2015. – С. 188–190.

32 Пластичная смазка, модифицированная наночастицами железа / В. И. Колесников, А. П. Сычев, М. А. Савенкова, **В. В. Авилов** // Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса юга России : труды Международной научно-практической конференции. В 3 ч. Ч. 2. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2015. – С. 59–60. – ISBN 978-5-88814-398-8.

33 Конденсированный фосфат никеля-цинка – новая противоизносная и противозадирная присадка к пластичным смазкам / В. И. Колесников, Ю. Ф. Мигаль, М. А. Савенкова, **В. В. Авилов** // Полимерные композиты и трибология (ПолиКомТриб-2013) : тезисы докладов Международной научно-технической конференции. – Гомель : Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого, 2013. – С. 166–172. – ISBN 978-985-6477-43-3.

34 **Авилов, В. В.** Неорганические фосфорсодержащие полимерные присадки для железнодорожных пластичных смазочных материалов / В. В. Авилов

// Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт-2013». – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2013. – С. 203–204.

35 **Авилов, В. В.** Противоизносная и противозадирная присадка к пластичным железнодорожным смазочным материалам – конденсированный фосфат никеля-цинка / В. В. Авилов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2. – С. 4–7. – ISSN 1818-5509.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве

В представленных работах автору принадлежат следующие результаты: анализ отечественного и зарубежного опыта разработки методов модификации поверхности и создания и применения новых смазочных материалов и присадок. В работах с соавторами личный вклад соискателя заключается в следующем: в работах [1, 3, 5, 24 - 26] – проведение модификации поверхности в жидких средах, участие в модернизации машины трения СМТ-1, трибологические испытания, анализ полученных результатов; [1, 2, 4, 6, 7, 8 - 17, 29, 31-33] – синтез присадок двойных метафосфатов, проведение трибологических испытаний, обработка результатов; [30, 34, 35] – самостоятельное проведение стендовых испытаний, обработка и объяснение результатов исследований; [18, 19, 27, 28] – участие в подготовке и проведении эксплуатационных испытаний; участие в разработке и проектировании многофункциональной машины трения [20, 22] и установки модифицирования поверхности «пятник – подпятник» грузового вагона; [21, 23] – разработка смазочного материала.

Авилов Виктор Владимирович

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ТРИБОСИСТЕМ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 09.10.2025. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,39.
Тираж 100 экз.

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

Адрес университета: 344038, Ростовская область, г. о. город Ростов-на-Дону,
г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, зд. 2, www.rgups.ru