

На правах рукописи



Новиков Евгений Сергеевич

**УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНО-
ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ
МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРИБОСИСТЕМ
И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ**

Специальность: 05.02.04 – Трение и износ в машинах

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону
2020

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, профессор РАН,
заведующий научно-исследовательской лабораторией «Нанотехнологии и новые материалы» научно-испытательного центра «Нанотехнологии и трибосистемы» НИЧ ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения».

Официальные оппоненты: **Бурлакова Виктория Эдуардовна**,
доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химия» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»;
Памфилов Евгений Анатольевич,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Триботехническое материаловедение и технологии материалов» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Ведущая организация: Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова.

Защита состоится «15» марта 2021 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.010.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС) по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 (главный корпус, конференц-зал).

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

Автореферат разослан «___» _____ 202 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 218.010.02
д.т.н., профессор



П.Н. Щербак

Актуальность темы исследования. В настоящее время огромные материальные и энергетические ресурсы расходуются на ремонт транспортных средств, машин, механизмов, большинство отказов в работе которых происходит из-за потери износостойкости трибосопряжений.

Поэтому крайне актуальным направлением исследований является повышение износостойкости, безотказности и долговечности металлополимерных и металлических узлов трения путем установления закономерностей взаимодействия поверхностных слоев, сопровождающегося изменением свойств и структуры трущихся материалов.

Актуальность этой задачи определяется тем, что, несмотря на активную работу ученых в этом направлении, до настоящего времени не получено четкого представления о процессах, протекающих на трибоконтакте, с учетом эволюции свойств материала в поверхностном слое как полимера, так и металла под влиянием деструкционных, диффузионных и сегрегационных процессов. Поэтому проблема создания новых композиционных полимерных материалов и разработки современных методов нанесения износостойких тонких поверхностных слоев на металлической поверхности остается достаточно востребованным направлением научного поиска.

Об актуальности таких исследований говорит и то, что они были поддержаны грантами Российского фонда фундаментальных исследований (проект 11-08-12087, проект 12-08-00972, проект 13-08-00-672, проект 13-08-00732), Российского научного фонда (проект РНФ № 14-29-00116, проект РНФ №16-19-10467), Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 14.607.21.0203 от 26.11.2018 (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI60718X0203)).

Степень разработанности проблемы. Если рассматривать развитие науки о трении в историческом аспекте, то следует констатировать, что она прошла путь от исследований на макроуровне, выйдя затем на мезоуровень и сегодня – уже на микроуровень. Способствовали этому достижения в области материаловедения, физики, химии, методов экспериментальных исследований и в первую очередь всех методов спектроскопии (ИК, РФЭС и др.). Наиболее активно проводятся работы в этом направлении учеными из России: В.И. Бутенко, И.Г. Горячевой, И.С. Гершманом, С.Н. Захаровым, В.И. Колесниковым, Ю.К. Машковым, В.Е. Паниным, С.В. Федоровым, а также их коллегами из Белоруссии, Германии, Китая, США, Украины, Финляндии, Франции, Японии и др. Однако, несмотря на успехи, изучение процессов трения на микроуровне требует дальнейшего исследования по оценке межатомных взаимодействий на зернограничных поверхностях. Именно такой подход открывает возможности создания нового класса металлополимерных и металлических трибосистем. Это и стало предметом исследования настоящей диссертации. Следует отметить: что касается повышения износостойкости узлов трения, то в последнее время растет интерес к использованию нанокристаллических алмазных пленок на поверхности металла. Исследования в этом направлении ведутся известными учеными в области наноматериалов и покрытий – Н.А. Азаренковым, Г. Глейтером, Н. Карвальо, П.А. Тополянским, Дж. де Хоссоном, В.М. Шулаевым и др. Однако вопрос критерия выбора покрытий для использования в нагруженных трибосопряжениях и сравнительной оценки их работоспособности остается открытым.

Объект исследования. Решение поставленных в диссертации задач будет рассмотрено для полимерных фрикционных материалов на примере тормозной системы «колесо – тормозная колодка» грузового подвижного состава, а для металлов – на примере такого тяжелонагруженного сопряжения, как шлицевое соединение хвостового вала вертолета МИ-26.

Предметом исследования является разработка методов управления диффузионно-сегрегационными и трибохимическими процессами при трении с целью повышения износостойкости металлополимерных трибосистем. Значительный объем исследования посвящен разработке методов алмазоподобных (DLC) покрытий для повышения износостойкости и ресурса тяжелонагруженных трибосопряжений.

Цель работы. Установление теоретических закономерностей и инновационных экспериментальных методов повышения износостойкости как металлополимерных, так и металлических трибосистем:

– для металлополимерных трибосистем – целенаправленный поиск способов транспортировки упрочняющих элементов в поверхностные слои металлического контртела, обеспечивающих повышение износостойкости за счет диффузионно-сегрегационных процессов;

– для металлических трибосистем основной целью является разработка материалов, технологии и режимов модифицирования металлической поверхности с помощью физических методов обработки поверхности и использования алмазоподобных (DLC) покрытий.

Методы исследования. Для выполнения поставленных целей в настоящее время имеется ряд прогрессивных концепций по изучению процессов в микроскопических объектах, в частности квантово-химические расчеты сегрегационных явлений, а также современная инструментальная база – сканирующая электронная микроскопия высокого разрешения (СЭМ), динамическое наноиндентирование, рентгеновская фотоэлектронная и оже-электронная спектроскопия (РФЭС и ОЭС), а также широкий спектр испытательного трибологического оборудования.

Научная новизна. На базе комплексного исследования и научного обобщения полученных результатов установлены критерии повышения износостойкости металлополимерного сопряжения, а именно:

– предлагаемые в работе квантово-химические расчеты позволили разработать методику оценки значений энергии химической связи с железом элементов, способствующих упрочнению, и затем путем модификации их в полимерный композит обеспечить их доставку в металлическое контртело;

– комплексные исследования тонкой структуры, физико-механических и трибологических свойств, а также механизмов изнашивания позволили оптимизировать процесс применения алмазоподобных (DLC) покрытий для повышения износостойкости тяжелонагруженных трибосистем, в частности получить градиентное распределение электронных конфигураций углерода sp^3 и sp^2 по сечению покрытия;

– установлено, что по мере приближения к подложке, на которую наносится DLC-покрытие, происходит аморфизация структуры покрытия и доля графитоподобной составляющей возрастает. В свою очередь, увеличение доли орбиталей sp^3 у поверхности покрытия свидетельствует о ее алмазоподобном строении. Иными словами, физико-механические свойства DLC-покрытий неоднородно распределены по глубине, что необходимо учитывать в технологии.

Теоретическая значимость работы. Разработана методика изучения сегрегационных процессов, происходящих в зоне металлополимерного трибосопряжения, с использованием квантово-химических расчетов. Результатом оценки энергии межатомного взаимодействия продуктов деструкции полимеров с металлическим контртелом явилось установление того, что некоторые элементы способствуют упрочнению, а некоторые – разупрочнению поверхностей металлического контртела, что позволяет сделать *принципиально новый в трибологии вывод о том, что трение может являться не только, как принято считать, разрушительным процессом, но возможно реализовать его как процесс созидательный.*

Для вакуумного ионно-плазменного покрытия установлено, что на величину адгезии DLC-покрытия оказывают влияние ионная имплантация (легирование) подложки Nb и/или Hf, а также нанесение промежуточных слоев в покрытие, например, тонкого нитридного слоя CrAlSiN.

Практическая ценность исследования

Выполненные теоретические исследования на основе квантово-химических расчетов, а также рентгеноэлектронные и оже-электронные спектроскопические исследования позволили:

- сформулировать критерии выбора наполнителей в композиционные полимерные материалы для металлополимерных трибосопряжений;
- разработать способ аттестации элементов трибосистемы, способствующих упрочнению контактирующих сопряжений, а также технологию трибоупрочнения;
- установить закономерности образования высокопрочных и антифрикционных поверхностных слоев тяжело нагруженных трибосопряжений, позволившие выбрать класс легирующих элементов и режимы алмазоподобных (DLC) покрытий, способствующие повышению износостойкости;
- разработать технологию формирования алмазоподобных (DLC) покрытий на поверхностях трибоконтакта трансмиссионных шлицевых соединений вертолета МИ-26, позволившую значительно увеличить износостойкость данной трибосистемы, а также тормозной системы «колесо – тормозная колодка».

Достоверность и обоснованность научных результатов. Выполненные теоретические исследования и полученные выводы основаны на данных квантово-химических расчетов, а экспериментальные результаты подтверждены данными рентгеноэлектронной и оже-электронной спектроскопии. Высокая сходимость теоретических исследований с лабораторными и стендовыми данными является достоверным подтверждением полученных результатов.

Апробация работы. Основные результаты теоретических и практических исследований доложены и обсуждены на совместных заседаниях кафедр «Теоретическая механика» и «Транспортные машины и триботехника» ФГБОУ ВО РГУПС и кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО ДГТУ; на международных научно-практических конференциях «Транспорт 2012–2019» (г. Ростов-на-Дону, г. Санкт-Петербург) и т. д.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 31 печатной работе, из них 10 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ и входящих в международные базы цитирования Scopus, Web of Science, Springer, Chemical Abstracts; в 1 патенте.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, библиографического списка, включающего в себя 188 наименований и 1 приложение. Работа изложена на 149 страницах основного текста, содержит 39 рисунков, 10 таблиц.

Основное содержание работы

Во *введении* обоснована актуальность темы исследования, подчеркивается, что трение и износ металлополимерных трибосопряжений – сложный многофункциональный процесс взаимодействия тонких поверхностных слоев, сопровождающийся изменением свойств и структуры трущихся материалов под воздействием диффузионных и сегрегационных процессов за счет химически-активных продуктов деструкции полимеров. Утверждается, что практически остается не раскрытым механизм интенсификации сегрегационных и диффузионных процессов, а также отмечается перспективность метода формирования тонких поверхностных слоев на металлической поверхности с использованием нанокристаллических алмазных пленок. Во введении оценивается степень разработанности поставленных целей российскими и зарубежными учеными, приводится использованное в работе современное исследовательское, диагностическое и испытательное оборудование, предмет и объект исследования, теоретическая и практическая значимость работы, обоснованность и достоверность выполненных исследований.

Первая глава посвящена эволюционному развитию науки о трении, а также изменению взглядов на природу износа от механических макропредставлений к атомно-молекулярным, представленным в работах российских и мировых школ: ученые России – Г.М. Бартенев, В.И. Бутенко, Н.А. Буше, И.А. Буяновский, Д.Н. Гаркунов, И.С. Гершман, И.Г. Горячева, Б.В. Дерягин, Ю.А. Евдокимов, И.В. Крагельский, В.Д. Кузнецов, В.Е. Панин, Д.Н. Поляков, А.А. Рыжкин, А.В. Чичинадзе, Г.И. Шульс, В.С. Щедров и др.; ученые Белоруссии – В.А. Белый, Н.К. Мышкин, А.И. Свириденко и др.; ученые Украины – Л.А. Бершацкий, Б.И. Костецкий и др.; зарубежные ученые – Н. Арчард, Н. Барбер, Х. Блок, Т. Иегер, М. Корнфельд, Ф. Линг, Г. Фазекас, Р. Хольм и др.

В настоящее время специалистами в области трения и износа проведен анализ современных аспектов фрикционного взаимодействия металлополимерных трибосистем с учетом диффузионных и сегрегационных процессов. При этом если диффузия достаточно давно рассматривалась в трибофизике, то сегрегационные процессы при трении стали предметом теоретических и эксперимен-

тальных исследований совсем недавно. Сегрегационные процессы, подобно диффузионным, также влияют на процесс трения и износа, но изучены недостаточно. При трении, в результате перестройки атомной архитектуры, происходит понижение свободной энергии на внешней поверхности трущихся образцов и на границах зерен – внутри.

Поэтому одними из центральных задач науки о трении в настоящее время являются изучение процессов диффузии и сегрегации в металлополимерных трибосистемах и поиск методов повышения их износостойкости путем введения упрочняющих элементов в полимерный композит и дальнейшей их триботранспортировки в металлическое контртело.

Обзор перспективных технологий и материалов для повышения износостойкости металлических нагруженных трибосопряжений показал, что одним из наиболее продуктивных направлений в этой области является применение технологий, формирующих наноструктурированные состояния контактной поверхности трения. На сегодняшний день наиболее универсальным и доступным для использования в научных и прикладных целях признается метод вакуумно-дугового осаждения PVD-покрытий. Одним из главных достижений последних лет в развитии этого метода считается применение плазменной ионной имплантации (легирования) подложки в процессе нанесения покрытий. Этот прием позволяет реализовать эффекты наноструктурирования в подложке и тем самым существенно повысить адгезию покрытий, снизить вероятность зарождения дефектов и трещин на границе «подложка – покрытие».

Перспективы развития ионно-плазменных методов состоят в освоении новых материалов и получении многофункциональных покрытий, поэтому современный научный интерес обращен к углеродным материалам – одному из самых привлекательных объектов исследований в сфере материаловедения и нанотехнологий. Углерод может принимать большое количество стабильных форм из-за его способности гибридизоваться в нескольких стабильных электронных состояниях и прочно связываться со многими другими атомами. Поэтому тонкие пленки на основе углерода обладают уникальной и регулируемой комбинацией свойств, таких как высокая твердость H и модуль упругости E , износостойкость, химическая стойкость и оптимальные трибологические характеристики. Среди углеродных материалов выделяются алмазоподобные покрытия (DLC), основу которых составляет смесь sp^2 - и sp^3 -углеродных электронных конфигураций. Большое разнообразие структур DLC-покрытий, включая аморфизованные и наноструктурные состояния, может быть реализовано путем вариации соотношения sp^2 - и sp^3 -связей углерода, регулируемых режимом нанесения или использованием легирующих компонентов (H, Si, F, N, B, O, Al, Cr и др. металлов). Целесообразность использования DLC именно в металлических и металлополимерных (водородсодержащих) трибосопряжениях в том числе обусловлена возможностью пассивации водородом реактивных поверхностных связей углерода покрытия, что существенно снижает адгезионные силы в зоне контакта и уменьшает трение. Доминирование в структуре покрытия sp^3 -конфигураций приближает его свойства к алмазу, обеспечивая сверхвысокую твердость и аномально низкий коэффициент трения μ – свойства, необходимые тяжело нагруженным поверхностям трения. Важным параметром оп-

тимизации износа DLC-покрытий является их толщина. Установлено, что удельная скорость износа тонкой (нанометрической толщины) пленки на основе углерода снижается с уменьшением толщины по экспоненциальному закону.

Таким образом, выполненный анализ перспективных технологий и материалов триботехнического назначения позволяет сделать выбор в пользу *метода вакуумно-дугового осаждения* в качестве рекомендуемого технологического способа и *DLC-покрытий* в качестве объекта исследований. В этом направлении диссертационной работы одной из основных задач становится поиск конфигурации DLC-покрытия, наиболее оптимальной для обеспечения износостойкости исследуемых металлополимерных трибосопряжений.

Во второй главе показана не только взаимосвязь диффузионных и сегрегационных процессов, но и их качественно конкурентные отношения на межкристаллитных границах зерен. Это обусловлено тем, что диффузия по границам зерен осуществляется наиболее подвижными атомами. Другие атомы менее подвижны и не принимают участия в диффузионном процессе, а имеют склонность к адсорбции и, попадая в адсорбционные ловушки, образуют на границах зерна дислокационные структуры. Из двух методов расчета сил химической связи атомов элементов – молекулярной динамики и квантово-химического – нами был выбран второй.

Зернограничная сегрегация может приводить как к повышению износостойкости поликристаллов, так и к снижению. Все зависит от величины связей «металл – металл» и «металл – сегрегированный атом». Исследования по квантово-химическому расчету энергии связи проводились в такой последовательности: сначала рассмотрено взаимодействие атомов элементов первых четырех периодов таблицы Д.И. Менделеева для 18-атомного и 30-атомного кластеров, затем для пяти периодов, затем расчет для 5-слойной пластины и 11-слойной модели и далее расчет взаимодействия для шести периодов. В результате трения сегрегационный кластер, представляющий собой зерна поликристалла, между нижним и верхним слоем которого расположены атомы из таблицы Менделеева, распадается на две части: кластер из чистого металла и адсорбционный кластер, состоящий из зерен металла и сегрегированных атомов из таблицы Менделеева (рисунок 1).

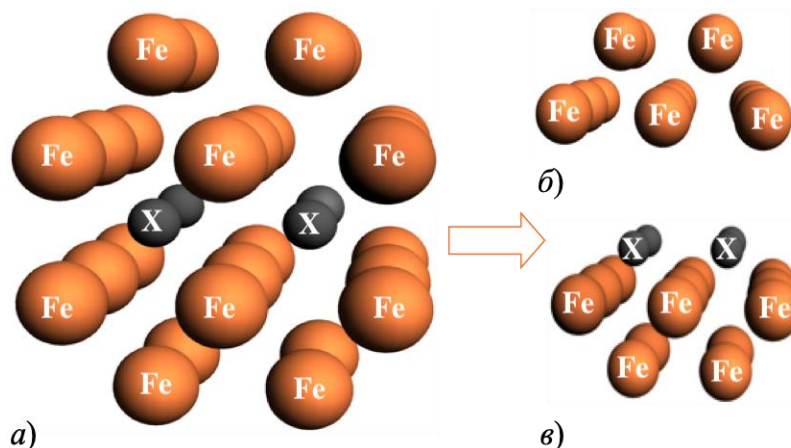


Рисунок 1 – Кластер из 30 атомов (сегрегационный – *а*) распадается на кластеры – адсорбционный (*б*) и чистое железо (*в*)

Дополнительно, для подтверждения полученных квантово-химических расчетов для кластерной модели, нами проведены расчеты для 5-слойной и 11-слойной периодических пластин. Результаты, представленные в таблице 1, фактически свидетельствуют, как и в случае кластерной модели, о том, что изменение энергии химической связи различных элементов с железом носит периодическую зависимость, в полном соответствии с периодическим законом Д.И. Менделеева, от заряда ядра атомов этих элементов. При этом, атомы, у которых энергии связи с железом больше, чем у самого железа Fe – Fe (ванадий, титан, марганец, молибден, вольфрам), могут служить легирующими добавками, сшивающими зерна железа и повышающими износостойкость стали. Что касается других атомов (сера, фосфор), то у них энергия связи с железом меньше, чем у самого железа Fe – Fe, и они разупрочняют зерна железа.

Таблица 1 – Значения энергии распада E_p (эВ) элементов для шести периодов таблицы Менделеева

Периоды	Группы элементов										
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			0
1	H 0,6										He 0,0
2	Li 0,8	Be 2,0	B 2,3	C 2,2	N 1,5	O 0,7	F 0,1				Ne 0,0
3	Na 0,5	Mg 1,2	Al 1,8	Si 2,4	P 1,3	S 0,2	Cl 0,3				Ar 0,0
4	K 0,9	Ca 1,4	Sc 1,8	Ti 2,4	V 2,6	Cr 2,2	Mn 1,9	Fe 1,7	Co 1,8	Ni 1,7	
	Cu 1,2	Zn 1,0	Ga 1,3	Ge 1,3	As 1,0	Se 0,0	Br 0,0				Kr 0,0
5	Rb 1,5	Sr 1,7	Y 1,7	Zr 2,3	Nb 2,1	Mo 2,0	Tc 1,8	Ru 1,9	Rh 1,9	Pd 1,4	
	Ag 1,0	Cd 1,1	In 1,1	Sn 0,8	Sb 0,6	Te 0,1	I 0,0				Xe 0,0
6	Cs ?	Ba 0,8	La 1,3	Hf 2,4	Ta 2,4	W 2,8	Re 2,4	Os 1,9	Ir 1,6	Pt 1,4	
	Au 0,4	Hg 0,6	Tl 1,6	Pb 0,6	Bi 0,2	Po 0,1	At 0,0				Rn 0,0

Из анализа результатов исследований, видно, что, для энергии распада E_p (эВ) в зависимости от атомного номера элементов из таблицы Менделеева, то характер изменения имеет следующий вид: в начальный период значение энергии распада снижается, затем увеличивается, и во второй половине периода снова отмечается снижение E_p , и такая же периодичность повторяется в остальных шести периодах.

В рамках таких результатов попытаемся найти ответ на вопрос, который мы поставили в самом начале нашей работы: «Можно ли и каким способом процесс трения из разрушительного сделать созидательным?».

Для проверки проведенных нами квантово-химических расчетов по улучшению физико-механических и трибологических характеристик была разработана методика и проведены лабораторные и стендовые исследования по диффузионно-сегрегационному насыщению металлических образцов в металлополимерной трибосистеме. С этой целью были выбраны элементы для насыщения исходя из анализа проведенных нами результатов квантово-химических расчетов энергии связи с железом: бор, молибден, вольфрам. Нами были опробованы различные методы доставки этих элементов в поверхностные слои металлического контртела. С учетом того, что бор достаточно легко диффундирует в сталь, был выбран метод печного борирования. Для этого на металлический образец из стали 65Г были нанесены борсодержащие соединения из тетрабората натрия и карбида бора, и затем этот образец был помещен в печь при температуре 750°C. Аттестация поверхностных слоев стали, подверженных борированию, проводилась методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и волнодисперсионного анализа (ВДА). Однако зафиксировать наличие бора этими методами оказалось невозможным из-за того, что на спектр интенсивности бора накладывается спектр углерода, который присутствует в стали. Нами были опробованы и другие методы – газопламенные и газоплазменные, но из-за диффузии бора на малую величину (несколько нанометров) также не удалось зафиксировать проникновение бора. Были испробованы и другие методы, в частности применение борной кислоты H_3BO_3 и соединения титана и железа с бором (Fe_2B и смесь $Fe+Ti$), также не показавшие значимых результатов. В итоге было принято решение использовать более мощное тепловое и механическое воздействие с помощью трения. Для этого была сконструирована и изготовлена машина торцевого трения. Нижний неподвижный диск из стали марки 30X13 размещался в термокамере, подключенной к источнику питания. На вал электродвигателя с помощью стакана крепился подвижный стальной образец – контртело.

На стальные диски по отдельности засыпались: на первый – порошок аморфного бора, на другой – ферротитан, и на третий – дисульфид молибдена. Контртело вращалось со скоростью $V = 1,5$ м/с по стальному диску, нагретому до 550°C, под нагрузкой 0,5 кН в течение двух часов.

По окончании эксперимента модифицированные поверхности трения подвергались очистке путем травления и измерялась микротвердость методом Виккерса. Для проведения трибологических исследований на износостойкость все образцы проходили испытание на трибометре «Tribometer TRB» в режиме возвратно-поступательного трения.

При создании высокого удельного давления в качестве контртела использовали твердый шарик из стали ШХ15 диаметром 6 мм. Режимы испытаний: удельное давление $P = 1,4$ ГПа, скорость $V = 0,1$ м/с, износ определялся методом профилометрии – путем измерения глубины и диаметра пятна износа. В результате проведенных исследований установлено, что твердость и износостойкость образцов, прошедших модификацию атомами молибдена, вольфрама и бора, выше, чем у образца без модификации (исходного), и по сравнению с ним увеличение твердости наибольшее у образцов с молибденом (на 10 %), а износостойкость увеличилась на 20 %.

Для исследования глубины стального диска, на которую проникают выбранные нами атомы молибдена, осуществлялось травление с помощью инертного газа Ag^+ ионной пушкой мощностью 5 Вт, при ускоряющем напряжении $U = 5,0$ КЕв, токе $I = 10$ мА, давлении в камере профилирования $P = 7 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. В результате установлено, что атомы молибдена проникают внутрь образца на глубину 0,5 мкм.

Для получения более полной картины качественного и количественного поведения образцов, модифицированных упрочняющими поверхностью элементами, нами были проведены испытания на инерционном стенде «колесо – тормозная колодка» при двухстороннем торможении. С этой целью были подготовлены тормозные колодки подвижного состава, в рецептуру которых добавляли отдельно следующие модификаторы: 1) тетраборат натрия + MoO_3 ; 2) тетраборат натрия + тетрафторборат калия; 3) тетраборат натрия + WO_3 .

Наполнение этих элементов в рецептуру колодки выполнялось в следующем составе: 5 % тетрабората натрия плюс 5 % каждого из модификаторов из оксидов вольфрама, молибдена и тетрафторбората калия KBF_4 . Порошки упрочняющих элементов измельчались с помощью бисерных мельниц до размеров 50 нм и засыпались в пресс-форму со стандартным содержанием рецептуры колодки ТИИР-300, содержащей каучук в качестве связующего, серу – в качестве вулканизирующей добавки, асбест – как армирующую составляющую, ускоритель вулканизации – 2-меркаптобензтиазол (каптакс), тиурам Д, углерод марки П-803, барит марок КБ-4, КБ-5, КБ-6. После заполнения пресс-форма закрывалась и под давлением $12,0 \pm 2,0$ МПа выдерживалась в течение 3 минут, и после мехобработки колодка подвергалась испытаниям.

Стендовые испытания осуществлялись двумя колодками с двух сторон в течение 10 часов в легком режиме при нагрузке $P = 1,0$ МПа и скорости вращения колеса $V = 1$ м/с и в тяжелом режиме – $V = 5$ м/с. Для проведения физико-механических и трибологических испытаний из поверхности катания колеса были вырезаны образцы размером 10×10 мм и толщиной 3 мм.

В результате исследований прошедшие испытания металлические образцы с поверхности катания цельнокатаного колеса (ГОСТ 10791-2011), проработавшего с модифицированными колодками, показали результаты: средние значения твердости образцов, проработавших с колодкой, работающей в легком и тяжелом режимах, в которой содержится бор, увеличилась на 23 % по сравнению с образцами, работающими с тормозными колодками без упрочняющих элементов; с молибденом твердость увеличилась на 12 % и с вольфрамом – на 9 %.

Трибологические испытания этих образцов на трибометре «Tribometer TRB» показали следующие результаты: интенсивность изнашивания у образцов, проработавших с колодкой, в которой содержится бор, уменьшилась на 19 % по сравнению с образцами, работающими с колодками без упрочняющих элементов, с молибденом – на 11 % и с вольфрамом – на 7 %.

Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на системе анализа поверхности SPECS (Германия) с использованием рентгеновского Mg-K α -излучения при вакууме не выше $9 \cdot 10^{-9}$ мбар выполнен анализ качественного и количественного элементного состава поверхности металлического образца с поверхности катания колеса, проработавшего с различными модифицированными тормозными колодками. Так, в таблице 2 представлен состав поверхности катания колеса подвижного состава до и после трибологических испытаний тормозных колодок с различной рецептурой модификации, а на рисунках 2–5 – спектры с поверхности катания колеса.

Таблица 2 – Состав элементов в поверхности катания колеса до и после трибологических испытаний тормозных колодок с различной рецептурой модификации:
модификатор 1: тетраборат натрия + MoO $_3$;
модификатор 2: тетраборат натрия + тетрафторборат калия;
модификатор 3: тетраборат натрия + WO $_3$

Элементы	Элементный состав поверхности катания колеса, проработавшего с колодкой:									
	Неочищенная поверхность	Очищенная поверхность	без модификатора		в составе которой модификатор 1		в составе которой модификатор 2		в составе которой модификатор 3	
			Легкий режим	Тяжелый режим	Легкий режим	Тяжелый режим	Легкий режим	Тяжелый режим	Легкий режим	Тяжелый режим
Na	–	–	1,9	2,2	1,4	3,0	0,4	4,0	–	5,8
Ba	–	–	13,6	24,0	16,4	17,9	14,3	28,9	17,6	29,4
Fe	15,4	45,3	11,4	15,4	15,3	14,4	15,4	4,5	19,3	9,8
F	–	–	0,3	1,1	–	2,2	1,6	0,8	–	–
O	37,6	45,4	43,5	37,2	45,4	43,3	35,5	38,7	42,2	33,4
Ca	–	–	0,7	0,8	–	0,3	0,8	1,0	2,2	2,7
C	47,0	9,3	25,5	14,9	13,4	13,8	28,3	14,9	13,8	12,8
Mo	–	–	–	–	2,1	2,2	–	–	–	–
B	–	–	–	0,6	–	–	0,3	1,2	–	–
S	–	–	1,9	1,6	1,7	1,4	1,6	1,2	1,9	1,7
P	–	–	–	–	–	–	–	0,2	–	–
Si	–	–	0,5	1,4	1,3	1,7	0,7	1,6	0,8	0,7
Al	–	–	0,7	0,8	1,3	1,5	1,1	3,0	1,6	2,0
W	–	–	–	–	–	–	–	–	0,6	1,7

На спектре с поверхности колесной стали (см. рисунок 2) при трении обычной колодкой (без модифицирования) в режиме $P = 1,0$ МПа и $V = 5,0$ м/с регистрируются линии неокисленного железа Fe2p с уровнем энергии (710 эВ), линии бария Ba3d (781 эВ), а также содержание кремния Si2p (90 эВ), кислорода O1s (530 эВ) и углерода C1s (285 эВ).

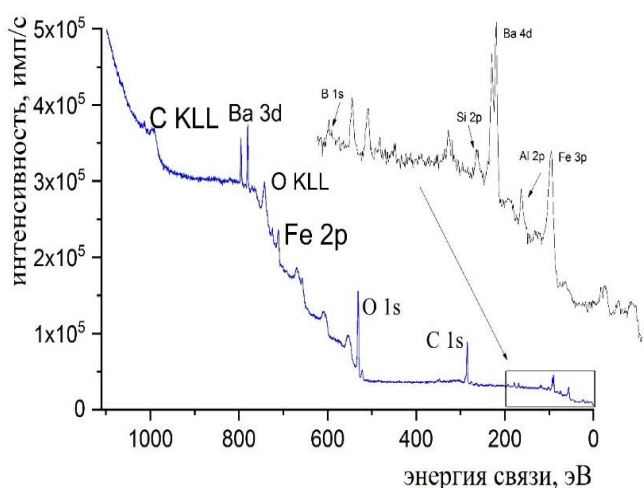


Рисунок 2 – Спектр поверхности трения после испытаний колодки без модифицирования в тяжёлом режиме ($P = 1,0$ МПа и $V = 5$ м/с)

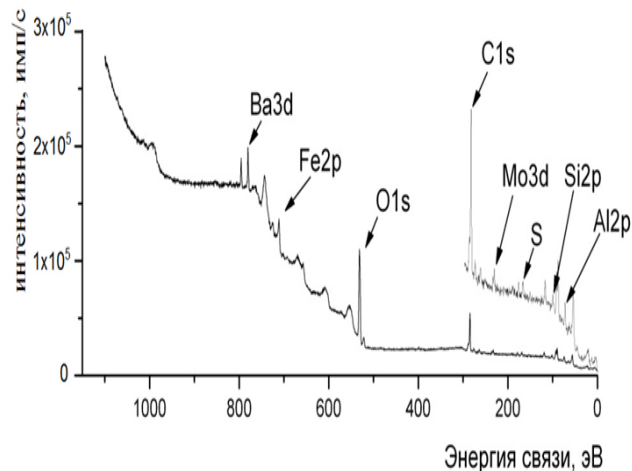


Рисунок 3 – Спектр поверхности трения после испытаний колодки с модификатором 1 в тяжёлом режиме ($P = 1,0$ МПа и $V = 5$ м/с)

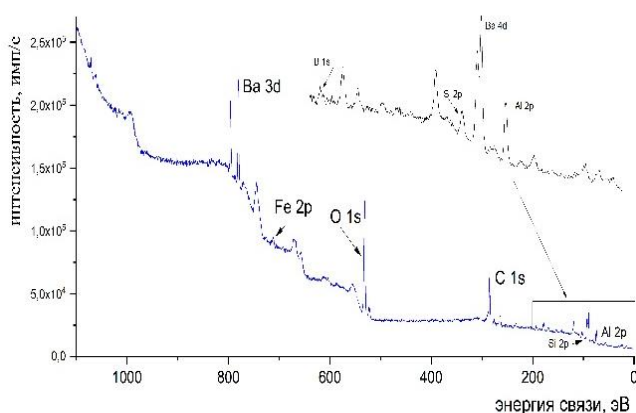


Рисунок 4 – Спектр поверхности трения после испытаний колодки с модификатором 2 в тяжёлом режиме ($P = 3,0$ МПа и $V = 5$ м/с)

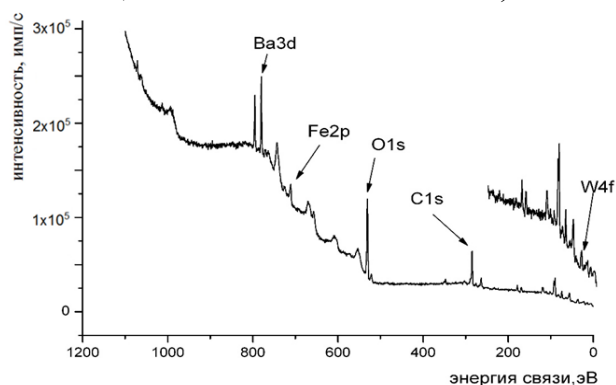


Рисунок 5 – Спектр поверхности трения после испытаний колодки с модификатором 3 в тяжёлом режиме ($P = 1,0$ МПа и $V = 5$ м/с)

Добавление модификаторов в тормозные композиционные колодки приводит к изменению состава в спектрах за счет элементов, входящих в модификаторы. Так, на спектре (см. рисунок 3) поверхности металлического образца после испытаний колодки с модификатором 1 (тетраборат натрия + MoO_3) в режиме $P = 1,0$ МПа и $V = 5,0$ м/с заметны линии молибдена Mo3d (228 эВ). На рисунке 4 представлен спектр металлической поверхности трения после испытаний колодки с модификатором 2 (тетраборат натрия + тетрафторборат калия) в режиме $P = 3,0$ МПа и $V = 5,0$ м/с, и видны линии бора B1s (188 эВ). А на ри-

сунке 5, на спектре металлической поверхности трения после испытания колодки с модификатором 3 (тетраборат натрия + WO_3) в режиме $P = 1,0$ МПа и $V = 5,0$ м/с регистрируется появление вольфрама W4f (36 эВ). Анализ таблицы 2 и рисунков 2–5 показывает, что металлы модифицирующих добавок переходят с поверхности катания колес, что способствует укреплению границ зерен. Следует отметить, что для иллюстрации изображения над основными спектрами, содержащими вольфрам, бор, молибден, приводится увеличенное изображение (рисунки 3–5).

В третьей главе диссертации исследована возможность управления показателями качества контактных поверхностей трибосопряжения путем формирования алмазоподобных DLC-покрытий. Экспериментальными исследованиями тонкого строения, физико-механических и трибологических свойств, а также путем изучения механизмов изнашивания при трении решалась прикладная задача поиска конфигурации DLC-покрытия, необходимой для повышения износостойкости нагруженных трибосопряжений. С этой целью для нанесения покрытий были выбраны два типа стальных подложек с поверхностной химико-термической обработкой (ХТО) в виде азотирования и цементации, используемых для изготовления ответственных силовых зубчатых или шлицевых передач трансмиссий в транспортном машиностроении.

Углеродные DLC-покрытия наносили в вакуумной камере установки PLATIT π^{80} при температуре 180–250 °С в течение 30–180 мин. В качестве рабочего газа использовалась смесь ацетилена C_2H_2 и метилсилоксана CH_3-Si-O . Вследствие этого получаемые DLC-покрытия состояли из двух слоёв. На поверхности образца располагался слой, насыщенный кремнием (из метилсилоксана) и занимающий 25–30 % толщины покрытия, а наружный слой покрытия практически полностью был углеродным (из ацетилена). Переходная область между слоями имела размытый характер диффузионной зоны. Покрытия на основе углерода отличаются от ионно-плазменных покрытий других систем (нитридных, карбидных, оксидных, металлокерамических, композиционных) однородностью структуры, которая методами микроскопии не дифференцируется. Поэтому изучение строения углеродных DLC-покрытий проводилось с помощью методик рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). А для обеспечения структурной вариативности покрытий были исследованы три их типа:

1) ординарное двухслойное DLC-покрытие, полученное из смеси ацетилена C_2H_2 и метилсилоксана CH_3-Si-O ;

2) ординарное двухслойное DLC-покрытие с предварительной ионной имплантацией подложки Ti, Nb, Hf;

3) комбинированное покрытие, технология получения которого включает ионную имплантацию (легирование подложки) Ti, Nb, Hf, нанесение нитридного покрытия системы CrAlSiN в качестве внутреннего износостойкого слоя и осаждение ординарного двухслойного DLC-покрытия в качестве наружного антифрикционного слоя.

Интервал значений толщины всех исследованных покрытий составил 0,8...1,8 мкм.

Изучение DLC-покрытий методом РФЭС было проведено путем послойного ионного профилирования (стравливания) поверхности покрытия со скоростью 2,6 Å/с на всю его глубину с помощью системы анализа поверхности SPECS. Результаты приведены в таблице 3. Источником излучения служила монохроматизированная линия Al-Kα. Разрешение анализатора на линии Ag3d_{3/2} составляло 0,35 эВ. Для определения соотношения sp³/sp² DLC-покрытий были использованы C (KLL) оже-спектры, выделенные в структуре обзорных электронных спектров. Расчет значений соотношения sp³/sp² выполнен с использованием параметра δ (эВ), который представляет собой расстояние между положительным и отрицательным экстремумами дифференциальных спектров C (KLL).

Таблица 3 – Распределение электронных состояний углерода по глубине ординарного DLC-покрытия

Спектральные характеристики	Время профилирования, мин.					
	Исходная поверхность (без профилирования)	10	20	30	70	90
Параметр δ, эВ	13,3	19,6	19,8	20,5	21,31	22,2
Доля sp ³ -связей, %	66,2	50,2	33,6	32,6	19,6	10,3
Доля sp ² -связей, %	33,8	39,2	56,3	67,3	80,3	89,3

Градиентное распределение соотношения sp³/sp² по глубине покрытия от 2/1 на поверхности до 1/9 у подложки свидетельствует о том, что структура DLC-покрытия является градиентной по глубине. По мере приближения к подложке происходит её аморфизация, и доля графитоподобной составляющей возрастает. В свою очередь, увеличение доли гибридных орбиталей sp³ у поверхности покрытия свидетельствует об алмазоподобной поверхности покрытия.

Измерение физико-механических характеристик DLC-покрытий проводилось по методикам непрерывного индентирования с использованием платформы Nanotest 600. Помимо традиционно измеряемых значений модуля упругости E и твердости H , комплекс физико-механических свойств включал соотношения H/E и H^3/E^2 , получаемые расчетом. Эти величины особенно важны при исследовании поведения покрытий под нагрузкой, поскольку для покрытий они определяют сопротивление упругой и пластической деформации соответственно. Результаты измерений сведены в таблицу 4, для анализа данных которой в качестве отправной точки (эталоны) использованы аналогичные характеристики материала подложек до нанесения покрытий:

- азотированный слой стали 38X2MЮА: $H = 12$ ГПа; $E = 241$ ГПа; $H/E = 0,0498$; $H^3/E^2 = 0,02975$ ГПа;
- цементованный слой стали 12X2H4А: $H = 6,42$ ГПа; $E = 200$ ГПа; $H/E = 0,0321$; $H^3/E^2 = 0,0066$ ГПа.

По комплексу базовых механических свойств (твердость H и модуль упругости E) углеродные DLC-покрытия не могут конкурировать с функциональными износостойкими покрытиями, например, нитридных систем. Что ка-

сается производных механических характеристик H/E и H^3/E^2 , то DLC-покрытия по этим показателям не уступают нитридным. Это следует из сравнения данных, полученных при нагрузке 10 мН, которые характеризуют свойства собственно покрытий (без участия влияния подложки). Причем для DLC-покрытий, нанесенных на азотированную поверхность подложки, наблюдается устойчивая тенденция к росту H/E и H^3/E^2 по мере усложнения архитектуры покрытия и увеличения числа технологических операций по его нанесению.

Таблица 4 – Физико-механические характеристики образцов с DLC-покрытиями

Характеристика	П о д л о ж к а					
	Сталь 38Х2МЮА (азотирование)			Сталь 12Х2Н4А (цементация)		
Вид покрытия	Ординарное	Ординарное с ионной имплантацией	Комбинированное	Ординарное	Ординарное с ионной имплантацией	Комбинированное
Толщина h , мкм	0,36–0,40	1,23–1,33	0,7–0,8	0,915–0,955	~0,4	0,5–0,6
H , ГПа:						
- при 100 мН	13,6	16,7	20,9	12,6	9,6	17,4
- при 10 мН	12,0	15,3	15,4	-	12,4	-
E , ГПа:						
- при 100 мН	206,5	201,3	219,0	164,9	176,8	198,1
- при 10 мН	174,2	191,6	153,7	203,8	170,6	198,9
H/E , ГПа:						
- при 100 мН	0,066	0,083	0,0954	0,0764	0,0543	0,0878
- при 10 мН	0,0689	0,080	0,1002	0,1585	0,0727	0,1493
H^3/E^2 , ГПа:						
- при 100 мН	0,059	0,115	0,1904	0,0736	0,0283	0,1342
- при 10 мН	0,057	0,0976	0,1546	0,8113	0,0655	0,6622

Испытания трибологических свойств покрытий выполнялись с использованием машины трения TRB по схеме «штифт – пластина» при возвратно-поступательном движении образца с амплитудой 800 мкм и частотой 10 Гц. Нагрузка на штифт –10 Н. В качестве контртела использован жестко закрепленный в штифте шарик из твердого сплава WC–Co диаметром 6,35 мм, поэтому испытания относятся к типу трения скольжения. Продолжительность испытания составляла 50 000 циклов. Основные определяемые трибологические параметры – коэффициент трения μ , интенсивность объемного износа образца J и контртела J_K .

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в условиях проведенных испытаний износостойкость исследованных DLC-покрытий существенно зависит от типа подложки. При нанесении DLC на углеродсодержащую подложку цементованной стали обеспечивается существенное снижение всех трибологических характеристик μ , J , J_K , тогда как на азотированной подложке DLC-покрытие способствует лишь снижению коэффициента трения (примерно в 1,5 раза). Для сравнительного анализа покрытий различных типов в таблице 5 приведены экспериментальные данные трибологических свойств ионно-

плазменных покрытий нитридных и углеродных систем. В качестве представителя DLC в таблице 5 показаны данные образца с максимальной твердостью поверхности покрытия, причем по механическим свойствам все представленные покрытия могут быть охарактеризованы как износостойкие и высокопрочные. Несмотря на это, их трибологические характеристики не свидетельствуют о снижении износа при использованной схеме испытаний. Из всех видов нитридных покрытий только наноструктурированные покрытия CrAlSiN характеризуются уменьшением износа как у образцов, так и у контртела, но коэффициент трения μ у них остается высоким.

Таблица 5 – Трибологические свойства образцов с ионно-плазменными покрытиями различных типов на подложке из цементованной стали 12Х2Н4А

Характеристика образцов	Трибологические свойства		
	μ	$J, 10^{-7} \text{ м}^3/\text{Н}/\text{м}$	$J_K, 10^{-7} \text{ м}^3/\text{Н}/\text{м}$
Сталь без покрытий	0,902	12,3	4,46
Монослойное покрытие TiAlN	0,756	12,91	4,79
Многослойное покрытие TiAlN	0,722	10,6	4,64
Наноструктурированное покрытие CrAlSiN	0,820	0,792	1,66
DLC-покрытие	0,330	3,88	0,91

На фоне покрытий нитридных систем DLC-покрытие существенно уменьшает коэффициент трения μ (в 2,5–3,0 раза), однако остальные их трибологические характеристики не дают четких закономерностей. Неоднозначность полученных результатов не позволяет выделить главный фактор, определяющий износ покрытий, и требует более глубокого изучения. С этой целью проведено *изучение механизмов износа DLC-покрытий* с помощью электронно-микроскопического (РЭМ) и энергодисперсионного (ЭДА) анализа дорожек трения.

Особенности строения и стадии формирования дорожки трения образцов с DLC-покрытиями представлены на рисунке 6. Каждая из отмеченных на рисунке зон (стадий) износа дорожки трения 1–5 имеет особую морфологию строения:

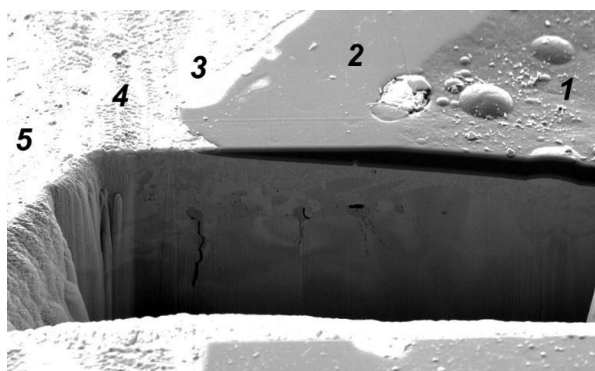


Рисунок 6. Строение различных областей (стадий) износа дорожки трения DLC-покрытия; РЭМ, кросс-секция, наклон образца 36 град.

1 – исходная поверхность DLC-покрытия с характерными капельными микродефектами диаметром около 1 мкм; 2 – поверхность износа DLC-покрытия, расположенная под углом к поверхности подложки; 3 – поверхность износа подложки с признаками пластической деформации, напоминающей выходы на поверхность полос скольжения; 4 – поверхность износа подложки с признаками пластической деформации, напоминающей выходы на поверхность полос скольжения; 5 – поверхность

износа подложки с признаками разрушения в виде трещин и содержанием кислорода 20–25 ат.%. Высокое содержание кислорода в зоне 5 указывает на формирование окисной пленки на подложке в области максимальных контактных напряжений и её растрескивание.

Учитывая характер поверхности зоны 2 на рисунке 6, относительно невысокую твердость (в слое покрытия, близком к подложке, при доминировании графитной гибридизации sp^2), а также особый характер пластичности, определяемый как упругопластическое состояние, механизм износа DLC-покрытий может быть классифицирован как механизм истирания, аналогичный изнашиванию износостойких резин. Это принципиально отличает износ исследованных углеродных покрытий от механизмов износа, например, нитридных покрытий, а также характеризует специфические свойства DLC-покрытий, проявляющиеся при работе в нагруженных трибосопряжениях. Среди них смазывающая способность и упругопластическое состояние, благодаря которому в период разгрузки в процессе трения покрытия способны к релаксации напряжений за счет сил поверхностного натяжения. Всё это позиционирует DLC-покрытия как функциональные антифрикционные покрытия трибологического назначения.

Четвертая глава диссертации посвящена стендовым испытаниям алмазоподобных (DLC) покрытий на поверхностях трибоконтакта трансмиссионных шлицевых соединений вертолета МИ-26.

Одним из наиболее распространенных методов соединений валов трансмиссии летательных аппаратов являются редукторы и муфты. Работоспособность соединений валов трансмиссии во многом определяется соединениями валов с главным, промежуточным и хвостовым редукторами посредством шлицевых муфт. Эксплуатационная эффективность и надежность тяжелонагруженных муфт привода вертолетов определяется как нагрузочно-скоростными условиями эксплуатации, так и трибологическими параметрами процессов трения во фрикционных подсистемах.

На разработанном и изготовленном стенде (рисунок 7) были проведены испытания заводских шлицевых муфт и муфт с покрытием CrAlSiN плюс алмазоподобные (DLC), а также покрытием Nb + Hf плюс DLC, по технологии, разработанной и представленной в главе 3, с использованием оборудования, оснастки и технологического процесса, описанного в главе 4.

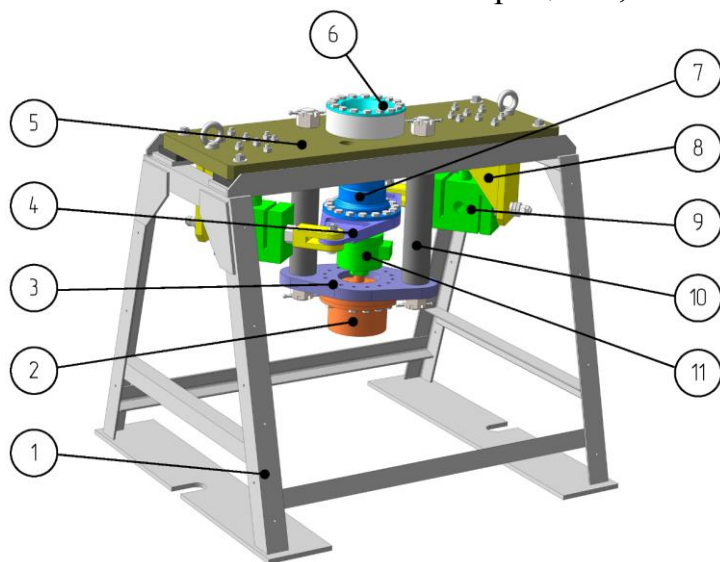


Рисунок 7 – Испытательный стенд, имитирующий работу трансмиссионного шлицевого соединения:
1 – станина; 2 – гидроцилиндр; 3 – нижняя плита; 4 – коромысло; 5 – верхняя плита; 6 – образец-наконечник; 7 – образец-стакан; 8 – стойка; 9 – тензорезисторный датчик С2Н-10-С3; 10 – распорка; 11 – тензорезисторный датчик U2В/50KN

Испытания, максимально приближенные к условиям эксплуатации шлицевых соединений, проводились с частотой 50 Гц, амплитудой 100 мкм, нормальной нагрузке 24 300 Н и 30 000 Н, продолжительностью 500 000 циклов и соответственно 1 000 000 циклов при возвратно-поступательном движении наконечника относительно неподвижного стакана.

Результаты проведенных стендовых испытаний показывают эффективность применения в тяжело нагруженных трибосопряжениях покрытий системы (CrAlSi)N+DLC. Использование DLC-покрытий, нанесенных на подложку после её вакуумного ионно-плазменного легирования (ионной имплантации) Nb и Hf, резко ухудшает износостойкость и способствует переносу материала покрытия со стакана на наконечник. Покрытие системы (CrAlSi)N+DLC способствует снижению объема износа в 4,5 раза при режиме испытаний с нагрузкой 30 000 Н и количестве пройденных циклов 1 000 000.

Заключение. Основные выводы

В результате проведенных исследований были разработаны научно-теоретические и практические критерии создания нового класса металлополимерных трибосистем и технология формирования алмазоподобных (DLC) покрытий на поверхности трибоконтакта, что позволяет сделать следующие выводы:

1 В результате анализа полученных теоретических и экспериментальных данных в сфере повышения износостойкости металлополимерных и металлических трибосистем сформулированы обобщенные инновационные рекомендации поиска управления фрикционными свойствами:

– для металлополимерных трибосистем – путем установления кинетики и механизма диффузионно-сегрегационного влияния на физико-механические и трибологические характеристики узлов трения и определения на этой основе элементного состава упрочняющих элементов, а также способов и режимов введения их в поверхностные слои металлического контробразца;

– для металлических трибосистем – путем разработки материалов, технологии и режимов модифицирования металлической поверхности с помощью физических методов обработки поверхности и использования алмазоподобных (DLC) покрытий.

2 Путем квантово-химических расчетов и применением рентгено-фотоэлектронной и оже-электронной спектроскопии установлено, что у одних элементов из периодической таблицы Д.И. Менделеева (бор, молибден, ванадий, марганец, титан) энергия связи атомов с железом больше, чем между атомами самого железа, а у других атомов (сера, фосфор, литий, кремний, медь, никель) энергия связи атомов с железом меньше, чем между атомами самого железа.

3 На основе разработанного способа аттестации элементов, способствующих упрочнению контактирующих сопряжений, предложена технология доставки этих элементов в металлическое контртело.

4 Исследования алмазоподобных покрытий методом РФЭС показали, что по мере приближения к подложке происходит аморфизация структуры покры-

тия и доля графитоподобной составляющей возрастает, о чем свидетельствует увеличение доли орбиталей sp^3 у поверхности покрытия.

5 Установлено, что тип подложки оказывает влияние на свойства углеродных покрытий DLC. Сила адгезии углеродной основы DLC и цементованной поверхности подложки выше, чем у азотированной подложки и DLC-покрытия, что подтверждается данными физико-механических и трибологических испытаний.

6 В случае разнородной поверхности «покрытие – подложка» положительное действие на адгезию DLC-покрытия оказывают ионная имплантация (легирование) подложки Nb и/или Hf, а также нанесение промежуточных слоев в покрытие из CrAlSiN, что нашло экспериментальное подтверждение для стакана муфты шлицевого соединения вертолета МИ-26 из стали 38Х2МЮА с газовым азотированием.

7 На основе выявленных закономерностей проведены сравнительные стендовые испытания, максимально приближенные к условиям эксплуатации заводских муфт и муфт с покрытиями CrAlSiN + алмазоподобные (DLC), а также покрытием Nb – Hf + DLC.

Установлено, что покрытие системы (CrAlSi)N+DLC способствует снижению объема износа в 4,5 раза.

Перспективы дальнейших исследований по данной работе

Полученные в работе зависимости энергии связи железа с различными атомами элементов периодической системы Д.И. Менделеева могут быть использованы в металлургии при добавлении легирующих и примесных добавок в поликристаллические материалы.

Разработанная технология повышения износостойкости металлополимерных трибосистем путем транспортировки с помощью трения упрочняющих элементов в металлическую поверхность открывает перспективу применения этого метода в широкий класс узлов трения машин и механизмов.

Для обеспечения безопасности работы тяжело нагруженных узлов трения крайне важна разработка методов достоверной информации о техническом состоянии этих систем за весь период их работы, прогнозирующей приработочный режим, остаточный ресурс, порог предупреждения и порог опасности.

Основные публикации по теме диссертации

По диссертации опубликовано 30 работ и 1 патент. Приведем основные:

I. Публикации в центральных изданиях, включенных в перечень периодических изданий ВАК РФ, международные реферативные базы данных и систем цитирования – 10 работ:

1 Моделирование процессов трения и изнашивания на атомном уровне / В.И. Колесников, Ю.Ф. Мигаль, **Е.С. Новиков**, И.В. Колесников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 3(47). – С. 162–168.

2 Совместимость химических элементов на границах зерен в стали / В.И. Колесников, Ю.Ф. Мигаль, И.В. Колесников, **Е.С. Новиков** // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 464, № 1. – С. 51.

3 Совместимость химических элементов на границах зерен в стали и ее влияние на износостойкость стали / В.И. Колесников, Ю.Ф. Мигаль, И.В. Колесников, **Е.С. Новиков** // Трение и износ. – 2015. – Т. 36, № 1. – С. 5–13.

4 Колесников, И.В. К вопросу о механизме влияния сегрегационных процессов на механические и трибологические характеристики материалов / И.В. Колесников, **Е.С. Новиков**, С.А. Данильченко // СТИН. – 2018. – № 3. – С. 38–40.

5 Kolesnikov, I.V. Influence of segregation processes on the mechanical and tribological characteristics of materials / I.V. Kolesnikov, **E.S. Novikov**, S.A. Danil'chenko // Russian Engineering Research. – 2018. – Т. 38, № 9. – С. 740–741.

6 Колесников, И.В. К вопросу о микроскопических исследованиях диффузионных и сегрегационных процессов в тяжело нагруженных трибосистемах / И.В. Колесников, **Е.С. Новиков**, В.И. Колесников // Журнал прикладной химии. – 2019. – Т. 92, № 2. – С. 236–244.

7 Use of vacuum ion-plasma coatings in the heavy-loaded tribo connections / V. I. Kolesnikov, **E.S. Novikov**, O.V. Kudryakov [et al.] // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2019) / Eds: I. Parinov, B.T. Long, NTH Minh, N.D. Toan, S.H. Chang. – 2019. – С. 169–170.

8 Колесников, В.И. Инновационный подход к изучению процессов трения, износа и мониторинга тяжело нагруженных трибосистем / В.И. Колесников, А.Л. Озябкин, **Е.С. Новиков** // Трение и износ. – Т. 40, № 4. – 2019. – С. 380–388.

9 Структурные аспекты износостойкости вакуумных ионно-плазменных покрытий / В.И. Колесников, О.В. Кудряков, **Е.С. Новиков** [и др.] // Физическая мезомеханика – 2020. – Т. 23. – № 1. – С. 62–77.

10 Технология повышения износостойкости тяжело нагруженных трибосистем и их мониторинг / В.И. Колесников, В.Д. Верескун, **Е.С. Новиков** [и др.] // Трение и износ. – 2020. – № 2. – С. 228–233.

II. Публикации в других изданиях – всего 20:

11 Мигаль, Ю.Ф. Взаимодействие атомов элементов первых четырех периодов с поверхностью зерен в стали / Ю.Ф. Мигаль, В.Н. Доронькин, **Е.С. Новиков** // Труды Всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2012». Ч. 2. – Ростов н/Д, ФГБОУ ВПО РГУПС, 2012. – С. 114–116.

12 **Новиков, Е.С.** Теоретическое обоснование целесообразности разработки методики введения бора в поверхностные слои стали / Е.С. Новиков // Труды Всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2012». Ч. 2. – Ростов н/Д, ФГБОУ ВПО РГУПС, 2012. – С. 120.

13 Взаимодействие атомов примесных и легирующих элементов с поверхностью зерен в стали / В.И. Колесников, Ю.Ф. Мигаль, **Е.С. Новиков** [и др.] // Вестник Южного научного центра РАН. – 2012. – Т. 8, № 4. – С. 27–33.

14 Interaction of atoms with grain surfaces in steel: periodic dependence of binding energy on atomic number and influence on wear resistance / Yu.F. Migal,

V.I. Kolesnikov, V.N. Doronkin, **E.S. Novikov** // *Advances in Materials Physics and Chemistry*. – 2012. – Т. 2, № 4. – С. 201–207.

15 **Новиков, Е. С.** Взаимодействие атомов элементов первых пяти периодов с поверхностью зерен в стали / Е.С. Новиков // Труды Всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2013». – Ростов н/Д, ФГБОУ ВПО РГУПС, 2013. – С. 297–299.

16 Колесников, В.И. Взаимодействие атомов с поверхностью зерен в стали и его влияние на износостойкость / В.И. Колесников, Ю.Ф. Мигаль, **Е.С. Новиков** // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «ПОЛИКОМТРИБ-2013». – Гомель, 2013. – С. 45.

17 Мигаль, Ю.Ф. Compatibility of chemical elements on grain boundaries and its influence on wear resistance of polycrystalline materials / Yu.F. Migal, V.I. Kolesnikov, **E.S. Novikov** // *Advanced Nano- and Piezoelectric Materials and their Applications*. – 2014. – С. 1–17.

18 Совместимость химических элементов на границах зерен железа и ее влияние на износостойкость стали / В.И. Колесников, Ю.Ф. Мигаль, **Е.С. Новиков**, И.В. Колесников // Труды XIV Междунар. науч. конф. «Трибология и надежность». – Санкт-Петербург, 2014. – С. 200–208.

19 **Новиков, Е.С.** Анализ межатомных взаимодействий на границах зерен железа с использованием модели двупериодической пластины / Е.С. Новиков // Труды Всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2014». – Ростов н/Д, ФГБОУ ВПО РГУПС, 2014. – С. 227–229.

20 Колесников, В.И. Совместимость химических элементов на границах зерен и ее влияние на износостойкость стали / В.И. Колесников, Ю.Ф. Мигаль, **Е.С. Новиков** // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «ПОЛИКОМТРИБ-2015». – Гомель, 2015. – С. 179.

21 **Новиков, Е.С.** Исследования влияния бора и его соединений на износостойкость поверхностных слоев колес локомотивов / Е.С. Новиков // Труды Междунар. науч.-практ. конф. «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России» – Ростов н/Д, ФГБОУ ВО РГУПС, 2015. – С. 232–234.

22 **Новиков, Е.С.** Способ упрочнения стальной поверхности / Е.С. Новиков, А. П. Сычев, Д. С. Мантуров // Труды Междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт-2015». – Ростов н/Д, ФГБОУ ВО РГУПС, 2015. – С. 41–42.

23 Мигаль, Ю.Ф. Формирование поверхностного слоя узлов трения с повышенной износостойкостью / Ю.Ф. Мигаль, В.И. Колесников, **Е.С. Новиков** // Сб. докл. Междунар. науч. конф. «МехТрибо-Транс-2016». – Ростов н/Д, ФГБОУ ВО РГУПС, 2016. – С. 213–217.

24 Migal, Yu.F. Impurity and alloying elements on grain surface in iron / Yu.F. Migal, V. I. Kolesnikov, **E.S. Novikov** // В сб. : *Фундаментальные и прикладные науки сегодня : матер. X Междунар. науч.-практ. конф. : в 3 т.* – 2016. – С. 97–100.

25 Мигаль, Ю.Ф. Разработка нового метода диффузионного введения упрочняющих элементов в поверхностные слои стали / Ю.Ф. Мигаль, В.И. Ко-

лесников, **Е.С. Новиков** // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «ПОЛИКОМТРИБ-2017». – Гомель, 2017. – С. 146.

26 Мигаль, Ю.Ф. Диффузионный метод борирования поверхности стали без образования боридов железа / Ю.Ф. Мигаль, В.И. Колесников, **Е.С. Новиков** // Сб. науч. тр. Всерос. нац. науч.-практ. конф. «Современное развитие науки и техники». – 2017. – С. 44–46.

27 Исследование физико-механических характеристик покрытия подпятника / А.П. Сычев, И.В. Колесников, **Е.С. Новиков** [и др.] // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2017. – № 26. – С. 73–77.

28 Сидашов, А.В. Микроскопический механизм разрушения поликристаллического материала тяжелонагруженных трибосистем и пути повышения их износостойкости / А.В. Сидашов, **Е.С. Новиков** // Труды Междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт: наука, образование, производство». – Ростов н/Д, ФГБОУ ВО РГУПС, 2018. – С. 179–182.

29 The degradation mechanisms in ion-plasma nanostructured coatings under the conditions of contact cyclic loads / V.I. Kolesnikov, **E.S. Novikov**, O.V. Kudryakov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – С. 012036.

30 The application of strengthening vacuum ion-plasma treating for the surface layer of constructional metal materials in mechanical engineering and the features of its formation / V.N. Kravchenko, **E.S. Novikov**, A.I. Voropayev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – С. 012040

III. Патент

31 Пат. 2585151 Российская Федерация. Способ упрочнения стальной поверхности / И.В. Колесников, А.В. Лапицкий, А.П. Сычев, **Е.С. Новиков**, В.В. Бардушкин // Патент на изобретение RUS 2585151 по заявке № 2015102037/02; опубл 23.01.15.

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. В работах с соавторами личный вклад соискателя заключается в следующем: в работах [1–3, 5, 11, 13–20, 24] проведение квантово-химических расчетов энергии связи атомов элементов таблицы Менделеева с железом; [4] – модифицирование поверхностных слоев лабораторных образцов методом ХТО борирования и проведение металлографических исследований полученных образцов; [6] – проектирование и создание машины торцевого трения, проведение диффузионного насыщения поверхностных слоев стали атомами упрочняющих элементов бора, титана, молибдена; [7–10, 29, 30] – разработка режимов нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий, проведение трибологических испытаний, исследование образцов методом СЭМ; анализ и обобщение результатов; [12, 21–23, 25, 26] – разработка способов диффузионного введения бора в поверхность лабораторных образцов – на основе методов ХТО, процесса, имитирующего процесс воздействия тормозной колодки и низкотемпературной диффузии; [27] – разработка модифицирующего состава колодки, блокирующего негативные сегрегационные процессы; [28] – проведение исследований поверхности разрушения поликристаллического материала методом СЭМ на наличие атомов элементов-сегрегантов.

Новиков Евгений Сергеевич

**УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНО-
ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ
МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРИБОСИСТЕМ
И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ**

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 29.12.2020. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,39.
Тираж 100 экз. Заказ № 10847.

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2.