

На правах рукописи



Мантуров Дмитрий Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
И МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ
ПУТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
ИХ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

Специальность 05.02.04 – Трение и износ в машинах

Автореферат
диссертации на соискание ученой 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: **Елагина Оксана Юрьевна**, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой трибологии и технологии ремонта нефтегазового оборудования ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»;

Шульга Геннадий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили и транспортно-технологические комплексы» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Защита состоится «21» декабря 2020 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 «___» ноября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 218.010.02
доктор технических наук, профессор



П.Н. Щербак

Актуальность темы исследования

XXI век – век инновационных технологий, больших нагрузок и скоростей на все виды транспорта, машин и механизмов – характеризуется усиленным вниманием к проблемам трения и износа трибосистем. В процессе эксплуатации изменяются структура, свойства и состояние материала сопряженных деталей. В связи с этим возникает необходимость в получении на трибоконтакте поверхностного слоя, обладающего способностью саморегулирования. Решение этой проблемы для металлополимерных трибосопряжений состоит в разработке функциональных наноматериалов, обеспечивающих образование на поверхности трибоконтакта вторичных структур, позволяющих направленно изменять трибологические параметры узла трения. Актуальность этой проблемы возрастает с широким применением в трибосистемах полимерных материалов, способных генерировать активные продукты деструкции и накапливать трибоэлектрические заряды. Это позволяет осуществить качественный научный прорыв путем применения в полимерном композите наноразмерных присадок, способствующих направленному перестраиванию структуры и свойств поверхностного слоя, а также формировать вторичные структуры. Раскрытие механизма и кинетики образования вторичных структур является весьма актуальным в плане создания технологии для разработки новых высокоэффективных самосмазывающихся полимерных композиций для металлополимерных трибосистем.

Основная задача в сфере инженерии поверхностей для металлических узлов трения – синтез технологий и материалов нанесения покрытий с заданными износостойкими свойствами. Из всего многообразия упрочнения поверхности и улучшения трибологических характеристик большие возможности, как будет показано далее, предоставляют методы вакуумной ионно-плазменной обработки. В результате планируется проведение исследований современных методов модификации металлической поверхности и получения на их основе многослойных покрытий с оптимизацией их нанесения. Несмотря на широкое внедрение ионно-плазменных покрытий, актуальность исследований в этой области возрастает в связи с отсутствием критериев выбора материалов и режимов технологии модифицирования металлической поверхности для широкого диапазона нагрузок и скоростей узлов трения. Учитывая, что лабораторные и стендовые испытания таких покрытий будут проводиться на конкретных изделиях – шлицевых соединениях хвостовой трансмиссии вертолета МИ-26М, работающих в режиме граничной смазки, то весьма актуальным и перспективным направлением является разработка высокоэффективных присадок к смазочным материалам, способных к формированию вторичных структур на металлическом контртеле.

О важности решения этих задач говорит тот факт, что исследования в этой области были поддержаны грантами Российского научного фонда (№ 14-29-00116), Министерства науки и высшего образования РФ (идентификатор проекта RFMEFI60718X0203) и Российского фонда фундаментальных исследований (№ 17-20-03176; № 18-08-00260).

Степень разработанности проблемы. Теоретические и экспериментальные исследования в области повышения износостойкости, надежности и долго-

вечности металлополимерных трибосистем ведутся как в России, так и за рубежом. Это школы академиков РАН В.Е. Панина, В.И. Колесникова, И.Г. Горячевой, профессоров – Г.А. Гороховского, В.И. Бутенко, С.В. Федорова, Ю.К. Машкова и др.; в Республике Беларусь – это школы В.А. Белого, А.И. Свириденка, Н.К. Мышкина. Поиску путей самоорганизации при трении на основе формирования вторичных поверхностных структур, посвящены работы Б.И. Костецкого, Л.И. Бершадского, В.Е. Клатески, А.А. Кутькова, Д.Н. Гаркунова. В работах Н.А. Буше и его учеников впервые сделана попытка связать результаты исследований вторичных структур с составом трущихся материалов. Однако в них отсутствуют исследования по изучению кинетики механизма образования вторичных структур на поверхностных слоях контактирующих металлополимерных узлов трения.

Что касается металлических трибосистем, то для получения высокоизносного поверхностного слоя на металле перспективным является создание тонких металлокерамических нанокпозиционных покрытий, получаемых методом вакуумных ионно-плазменных технологий. Это направление плодотворно разрабатывается в исследованиях А. Cavaleiro, Q. Luo, J. Musil, P. Zeman, S. Veprek, P. Eh. Novserian, J.J. Zhang, А.Д. Погребняка, А.А. Лозована и др. Однако в настоящее время детально не изучен механизм изнашивания ионно-плазменных покрытий при работе трибосопряжений в широком диапазоне режимов сухого трения и в режиме граничной смазки, что относится к исследуемым нами шлицевым соединениям хвостовой трансмиссии вертолета МИ-26М. Научные работы по изучению свойств масел и пластичных смазок, большой вклад в развитие которых внесли И.А. Буяновский, Р.М. Матвеевский, А.М. Данилов, Г.И. Фукс, В.В. Синицын, В.Г. Бровер, Б.П. Тонконогов и другие, посвящены поиску новых присадок, модифицированию масел, позволяющих улучшить стабильность к окислению, расширить диапазон рабочих температур и улучшить антифрикционные характеристики.

Объект исследования. Решение обозначенных актуальных задач иллюстрируется на примере повышения эксплуатационных характеристик узлов «пятник – подпятник» грузового подвижного состава и трансмиссионных шлицевых соединений вертолета МИ-26.

Предметом исследования является установление закономерностей формирования вторичных структур в металлополимерном узле трения, а также создание технологий модифицирования металлической поверхности путем ионно-плазменного напыления, а для смазочных материалов – разработка высокоэффективных присадок к ним, способных к формированию вторичных структур на металлическом контртеле.

Цель работы: установление закономерностей формирования вторичных структур на поверхностях трения; разработка на этой основе нового класса композиционных материалов и методов управления фрикционными свойствами металлополимерных трибосистем путем:

- разработки наполнителей и наноразмерных добавок в полимеры с целью формирования необходимых вторичных структур на поверхностях трения металлополимерного сопряжения;

- разработки технологий и новых материалов для формирования необходимых вторичных структур на поверхностях трения металлических материалов;
- создания высокоэффективных наноприсадок к смазочным материалам, обеспечивающих образование на поверхностях трибоконтакта необходимых вторичных структур.

Методы исследования. Для выполнения поставленных задач в работе использовались фундаментальные положения в области физики, химии, материаловедения и трения, а также современные экспериментальные методики исследования состава, строения и свойств использованных материалов, покрытий и контактных поверхностей: оптической металлографии, электронной микроскопии, рентгеновского и энергодисперсионного анализа, методов спектрометрии, микро- и наноиндентирования; выполнены стандартизированные и стендовые испытания по определению физико-механических и трибологических характеристик. В качестве инструментальных средств применяли следующее оборудование и приборы: оптические микроскопы METAM PB 22 и ZEISS Neophot 21; электронные сканирующие микроскопы ZEISS EVO MA 18 и двулучевой (электронный/ионный) ZEISS CrossBeam 340, оснащенные энергодисперсионными рентгеновскими детекторами (EDAX) модели X-Max 50N; система анализа поверхности Specs для рентгеноэлектронной и оже-электронной спектроскопии; инфракрасный фурье-спектрометр Nicolet Series; микроскоп LEXT OLS5000 для определения морфологии, микрорельефа и анализа поверхности трения; многофункциональная платформа для исследования механических свойств твердых тел NANOTEST 600; бисерная мельница Mikro Cer для измельчения твердых частиц; машины трения ИИ5018 и TRB, а также разработанная, изготовленная и протестированная нами установка для исследования эксплуатационных характеристик трансмиссионных шлицевых соединений вертолета МИ-26.

Научная новизна заключается в разработке методов повышения износостойкости контактных поверхностей трибосопряжения на основе результатов исследования вторичных структур. К наиболее значимым научным результатам относятся следующие:

1. Разработана технология рационального выбора наполнителей – аримида-Т, шпинели, фторопласта – в матрицу фенилона С-2, позволившая значительно улучшить трибологические характеристики металлополимерного сопряжения.

2. Доказано, что высокие значения механических свойств, так же как и упорядоченная слоистая структура, вакуумных ионно-плазменных покрытий (покрытия системы TiAlN) не гарантируют повышение износостойкости трибосопряжения. Снижение износа контактных поверхностей пары трения достигнуто путем формирования гетерофазной наноструктуры покрытия (покрытия системы CrAlSiN) и оптимизации его толщины (на уровне 1,0–1,5 мкм).

3. Показано, что состав и структура ионно-плазменных покрытий определяют механизм их изнашивания при трибоиспытаниях, что и является основной причиной их различной износостойкости. Так, в силу недостаточной теплостойкости покрытие системы TiAlN при использованных режимах трения испытывало окислительный механизм износа и разрушалось быстрее (в 5 раз и более), чем покрытие системы CrAlSiN, которое испытывало усталостный механизм износа.

4. Установлены условия для выбора материалов и режимов технологии нанесения ионно-плазменных покрытий, а также принципы соответствия физико-химических свойств трансмиссионного масла с нанодобавками составу нанесенных ионно-плазменных покрытий.

Теоретическая значимость работы:

1. Изучен механизм образования вторичных структур. Установлено, что процесс их образования проходит в определенной последовательности, что позволило создать новый класс антифрикционных полимерных материалов.

2. Установлено, что для наполненных полимеров образование вторичных структур возможно, как от наполнителя и матрицы по отдельности, так и от обоих компонентов одновременно.

3. Показано, что для достижения эффекта повышения износостойкости при использовании ионно-плазменных покрытий в тяжело нагруженных трибосопряжениях толщина покрытия должна быть минимизирована. Толщина покрытия определяется моментом дислокационной пассивации границы раздела «покрытие – подложка», который в покрытиях CrAlSiN наблюдался при толщине 0,8–1,2 мкм.

4. Разработаны принципы совместимости компонентов нанесенных тонких износостойких ионно-плазменных покрытий с составом смазочного материала.

Практическая ценность исследования:

1. Выполненные исследования послужили научной основой для целенаправленного выбора наполнителей и микродобавок неорганического и органического происхождения.

2. Разработаны пути повышения износостойкости металлополимерных узлов трения, учитывающих свойства полимерных композитов образовывать на трибоконтантной поверхности вторичные структуры.

3. Проведенные исследования позволили разработать научно обоснованную технологию получения вакуумных ионно-плазменных покрытий различных металлокерамических нитридных систем в виде требований к поверхности триботехнического изделия (подложке), режимов нанесения покрытий, комплексных характеристик их физико-механических и трибологических свойств.

4. На основе выполненных экспериментальных исследований рекомендованы износостойкие ионно-плазменные покрытия системы CrAlSiN с гетерофазной наноструктурой для использования в тяжело нагруженных трибосопряжениях различных транспортных средств и летательных аппаратов.

5. Исследования завершены стендовой проверкой разработанных износостойких композиционных материалов в тяжело нагруженных трибосистемах подвижного железнодорожного состава.

6. В результате разработанной технической и нормативной документации по ионно-плазменной модификации поверхности представлены предложения компании ПАО «Роствертол» по повышению износостойкости и надежности шлицевого соединения для вертолета МИ-26 с учетом совместимости смазочного материала с нанодобавками и модифицированных поверхностных слоев трибоконтакта «металл – металл».

Достоверность и обоснованность научных результатов. Теоретические исследования и выводы подтверждены сходимостью результатов с экспериментальными, которые были проведены современными инструментальными средствами – электронной микроскопии, рентгеноэлектронной и оже-электронной спектроскопии, ИК-фурье-спектроскопии, наноиндентирования и др.

Апробация работы. Основные положения работы обсуждались на международных научно-практических конференциях «Транспорт-2012–2020 гг.; 20-й Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении – 2014»; Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы трибологии технологических, энергетических и транспортных машин» в 2014 г.; Международной конференции «Физика и механика новых материалов и их применения» (PHENMA 2017); Всероссийской национальной научно-практической конференции «Современное развитие науки и техники» («Наука-2017»); Международной конференции «Пленки и покрытия – 2017».

Публикации. Основное содержание работы и результаты исследований опубликованы в 36 научных работах (общим объемом 18,21 п.л., лично автору принадлежат 5,91 п.л.), в том числе 6 работ – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 7 публикаций в изданиях, включенных в базы данных Scopus и WoS, 2 патента РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 201 наименований. Общий объем работы составляет 160 страниц, включает 48 рисунков и 14 таблиц.

Основное содержание работы

Во *введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, отмечена степень разработанности российскими и мировыми школами поставленных целей и задач, позволивших определить дальнейшие исследования, направленные на получение на трибоконтакте поверхностного слоя, обладающего способностью саморегулирования. При этом решение поставленных задач является весьма актуальным в сфере инженерии как полимерных, так и металлических поверхностей узлов трения. Во введении также обозначены предмет и объект исследования, научная новизна и теоретическая значимость работы, практическая ценность, достоверность и обоснованность научных результатов.

В первой главе, посвященной современным представлениям о природе трения, механизме изнашивания металлополимерных и металлических систем и методах формирования структуры и свойств их контактных поверхностей, представлен обзор и анализ работ российских и зарубежных ученых в этой области. Показано, что по мере развития техники, повышения требований к трибосистемам, а также развития экспериментального инструментария наука о трении и износе выходит на микроуровень. Наиболее активно работы в этом направлении ведутся в Японии, ЕС, Китае, США, Южной Корее, Сингапуре, России, Белоруссии.

В результате анализа процессов, происходящих на трибоконтакте «полимер – металл» показано, что для повышения трибологических характеристик качественным научным прорывом является реализация образования вторичных структур в зоне контакта.

При этом обосновывается, что исследования должны быть представлены перспективным направлением – разработкой теоретических исследований механизма и кинетики фрикционного переноса, а также практических рекомендаций по управлению фрикционными свойствами узлов трения с позиций структурной приспособляемости (СП) трущихся сопряжений с образованием вторичных структур, которые локализуются в тонком поверхностном слое. Особенно перспективным в этом плане является введение наполнителей, используемых в качестве нанодобавок, а также применение природных минералов, диспергированных до наноразмерного состояния.

С точки зрения инженерии поверхностных слоев металлических тел и повышения их работоспособности в работе проанализированы различные способы модификации поверхности, как традиционные – термоупрочнение или химико-термическая обработка, так и наиболее перспективные – обработка концентрированными потоками энергии (КПЭ) и применение износостойких и антифрикционных покрытий. Однако технологии КПЭ, как правило, предполагают протекание жидкофазного процесса, что приводит к формированию большой неоднородности состава, структуры и свойств покрытия, а также создает разветвленный рельеф поверхности. Эти особенности с точки зрения трибологии рассматриваются как негативные.

В связи с этим особого внимания заслуживает вакуумная ионно-плазменная технология, которая лишена недостатков, присущих методам КПЭ, и позволяет получать покрытия и тонкие пленки с широким полем функциональных свойств, с большим разнообразием составов и структурных типов, включая наноструктурированные и нанокпозиционные. Значительным технологическим преимуществом вакуумной ионно-плазменной технологии по сравнению с методами КПЭ является возможность реализации в едином технологическом цикле наноструктурного модифицирования подложки путем ионной имплантации и нанесения плотных однородных тонких функциональных покрытий. Кроме того, решение таких невыясненных до сего времени проблем, как влияние толщины оптимального покрытия, влияние шероховатости подложки на прочностные свойства покрытия к ней, позволит обеспечить структурную и химическую адаптацию поверхности к изменяющимся условиям эксплуатации.

Учитывая, что лабораторные, стендовые испытания будут проводиться на материалах и конкретных изделиях – шлицевых соединениях хвостовой трансмиссии вертолета МИ-26М, работающих в режиме граничной смазки, то нами проведен анализ исследований материалов и способов модифицирования трансмиссионных масел для шлицевых соединений и поставлена задача разработать присадки к этим маслам, способные к формированию вторичных структур на трибоконтакте.

Все вышесказанное позволило обосновать цель работы, выбрать методы исследования и поставить конкретные задачи.

Вторая глава посвящена исследованию механических и трибологических характеристик модифицированных полимерных композитов с нанодобавками, а также изучению кинетики и механизма образования вторичных структур на три-

боконтрактной поверхности металлического контртела. Для проведения испытаний были подготовлены образцы из полимерного материала – фенилона С-2 с наполнителями: фторполимером 4МБ, волокнами арамида-Т и наноразмерными добавками шпинели ($\text{FeAl}_2\text{O}_4 + \text{MnAl}_2\text{O}_4$). По результатам на приборе Nano-Test600 были вычислены следующие физико-механические свойства: E – модуль упругости; H – твердость; H^3/E^2 – индекс пластичности, характеризующий сопротивление пластической деформации, и H/E – индекс упругости, характеризующий сопротивление материала при нагружении. Из анализа экспериментальных данных следует, что добавление арамида-Т в матрицу фенилона С-2 практически не меняет значение микротвердости, добавление фторопласта-4МБ снижает значение микротвердости на 3–12 % в зависимости от его процентного содержания в фенилоне, а добавление шпинели увеличивает значение микротвердости на 14 %.

Для оценки трибологических характеристик композита была разработана методика и проведены испытания на машине трения ИИ-5018 по схеме «ролик – палец», а для исследования механизма вторичных поверхностных структур была сконструирована машина торцевого трения по схеме «диск – палец». Результаты испытаний показали, что наилучшими показателями (минимальный коэффициент трения и максимальная износостойкость) обладают образцы: фенилон С-2 + фторопласт-4МБ (10 %) + шпинель (5 %) (рис. 1, а) и фенилон С-2 + фторопласт-4МБ (10 %) + арамид-Т (5 %) + шпинель (3 %) (рис. 1, б).

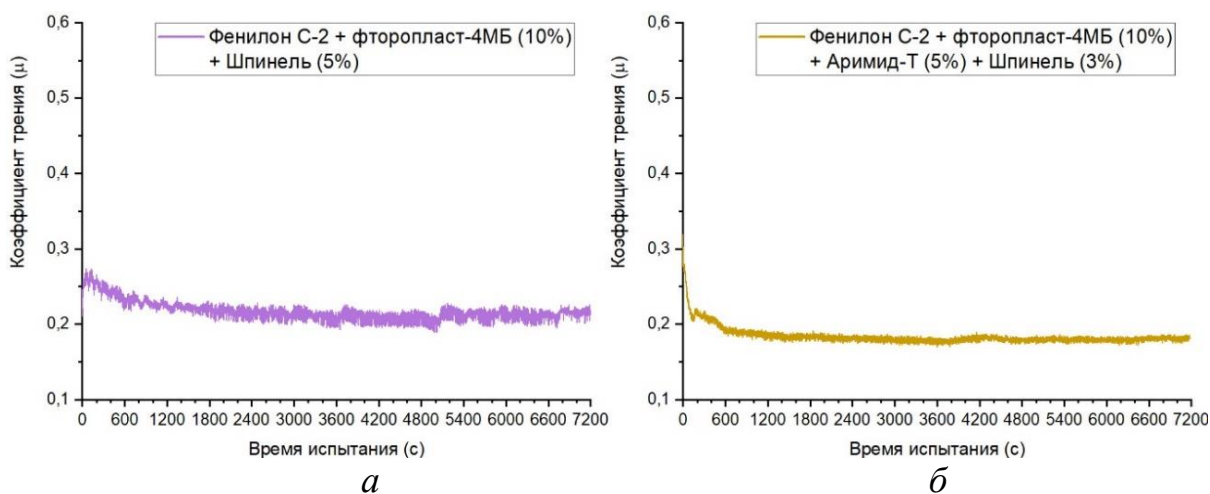


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от времени испытаний гибридных композиций на основе фенилона С-2 (при скорости скольжения 0,5 м/с и нагрузке 1 МПа), полученная на торцевой машине трения

Полученные результаты трибологических исследований позволяют считать, что основным условием минимального коэффициента трения и высокой износостойкости является образование между трущимися поверхностями необходимых вторичных структур. Для подтверждения этого нами проведена оценка качественного и количественного состава образовавшихся вторичных структур на поверхности трибоконтакта. Исследования вторичных структур проводили методами ИК-спектроскопии на ИК-фурье-спектрометре Series Nicolet 380 и рентгеновской фотоэлектронной и оже-электронной спектроскопии на приборе SPECS.

Проведенный анализ ИК-спектров образцов на основе фенилона с добавлением фторопласта-4МБ (5 %) позволяет проследить механизм образования вторичных структур. В начальный период трения на поверхности металлического образца наблюдаем продукты износа из фенилона С-2, и подтверждением этого является регистрация в ИК-спектре полос фенилона С–О и С=О ($1300\text{--}1750\text{ см}^{-1}$). Затем, через небольшой промежуток времени, в ИК-спектре появляются полосы валентной С–F ($1150\text{--}1200\text{ см}^{-1}$), относящиеся к фтору. Полученные результаты позволяют говорить о следующей модели образования вторичных структур: с момента начала процесса трения продукты износа фенилона С-2 за счет адгезионных сил удерживаются на поверхности трения металлического контртела, а затем из продуктов износа фторопласта формируется второй слой и удерживается на первом слое из фенилона электростатическими силами за счет их разнополярности.

Для исследования качественного и количественного состава образовавшихся вторичных структур использовали методы оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, были получены обзорные и внутренние электронные спектры, по которым определялись продукты износа с исследуемых образцов.

Исследование спектров проводили для следующих композитов: фенилон С-2 + фторопласт-4МБ (5 % и 10 %); фенилон С-2 + фторопласт-4МБ (20 %) + ариимид-Т (5 %); фенилон С-2 + фторопласт-4МБ (10 %) + ариимид-Т (5 %) + шпинель (3 %).

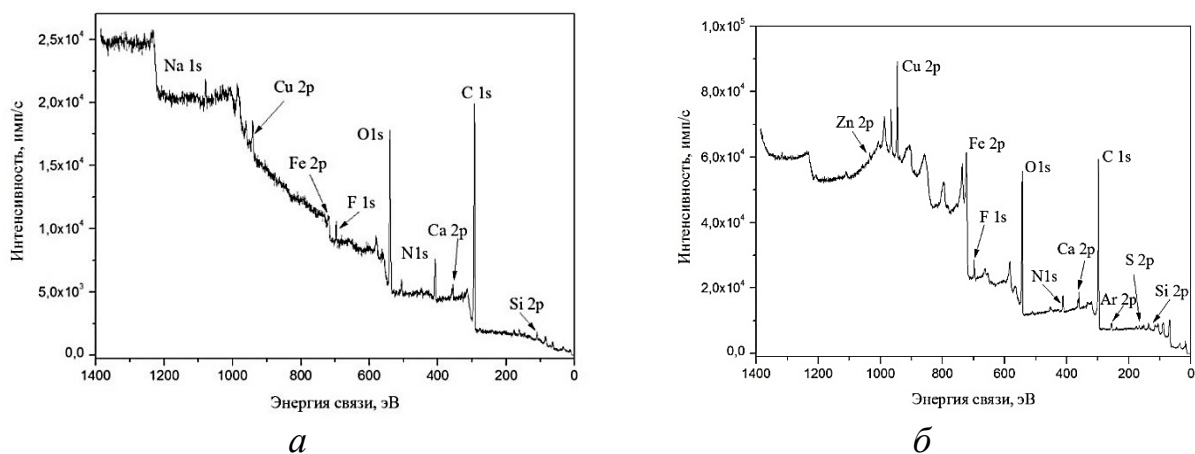


Рис. 2. Спектры РФЭС, полученные с трибоконтактной поверхности стального диска после трибологических испытаний, состоящей из фенилона С-2 + фторопласт-4МБ (10 %): *а* – исходный спектр; *б* – спектр после профилирования ионами аргона на глубине 3 нм

Для получения информации о элементном составе вторичных структур, их качественного и количественного распределения в граничном слое трибосопряжения были получены обзорные и внутренние спектры с помощью РФЭС и РЭС- спектроскопии.

Анализ рентгеноэлектронных спектров перенесенных продуктов износа исследуемых образцов и энергии связи перенесенных химических элементов во вторичные структуры показывает, что при добавлении к фенилону С-2 фторопласта-4МБ в спектре помимо линий азота, кальция, натрия, хлора, кремния просматри-

ваются рентгеновские спектры внутренних линий F1s и C1s. При этом F1s характеризует связь F–F с энергией 684,6 эВ, а C1s – связь C–F с энергией 285 эВ и связь C–C с энергией 288 эВ (рис. 2).

Добавление в композит арамида-Т в целом не меняет спектральную картину. При добавлении шпинели в спектре наблюдается появление Al 2p с энергией связи 74 эВ (рис. 3) и стабильная работа образованных структур на поверхности длится значительно дольше со значительным снижением коэффициента трения.

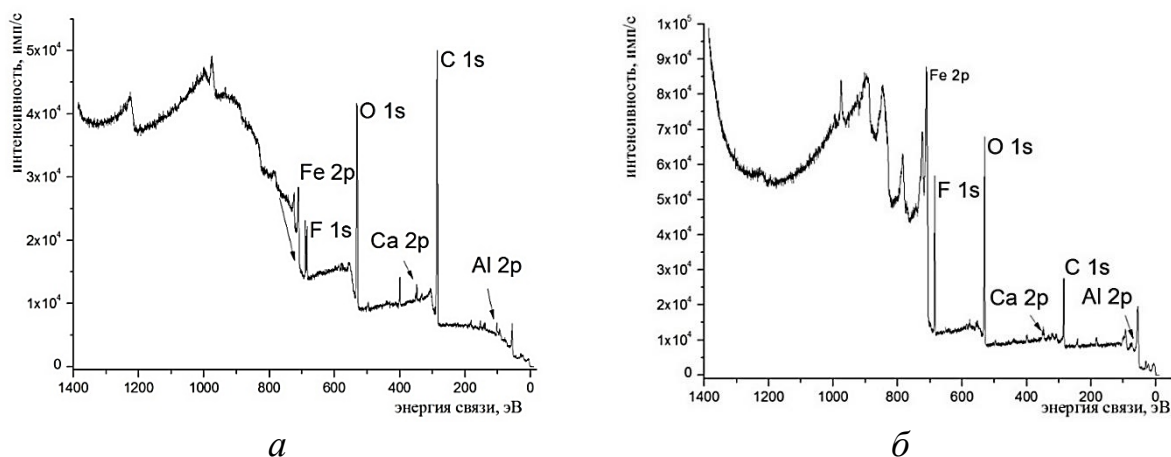


Рис. 3. Спектры РФЭС, полученные с трибоконтактной поверхности стального диска после трибологических испытаний с композицией, состоящей из арамида-Т (5 %), фторопласта – 4МБ (10 %), 3 % шпинели к связующему фенилону С-2: *а* – исходный спектр; *б* – спектр после профилирования ионами аргона на глубине 3 нм

Следует отметить, что при ионном профилировании поверхности трения электронные спектры качественно не меняются, а происходит количественное изменение каких-либо компонент, что означает наличие процессов реорганизации химической связи во вторичных структурах в процессе трения.

Таким образом, на основании выполненных исследований можно сделать вывод о том, что в результате фрикционного взаимодействия на поверхности металлического контртела присутствует тонкий защитный слой, сформированный вторичными структурами. Наличие в РФЭС-спектре компоненты с энергией связи 685 эВ, которая относится к спектру фтора, дополнительно свидетельствует о наличии связи между металлом подложки (контртела) и фтором.

При проведении анализа механизма и кинетики образования вторичных структур следует остановиться на роли каждого из компонентов. Фенилон С-2 выступает в качестве не только связующего, но и материала, обладающего теплоустойкостью в широком температурном интервале и выдерживающего большие нагрузки; фторопласт отличается способностью формировать при трении поверхностные структуры с малым сдвиговым сопротивлением и разной электрической полярностью с фенилоном, что способствует увеличению сил адгезии с ним. Волокнистый наполнитель «аримид-Т» компенсирует низкие механические характеристики фторопласта-4МБ и придает композиции высокую прочность и несущую способность.

Что касается роли шпинели, то механоактивированные мелкодисперсные частицы шпинели обладают высоким пределом прочности, что является одной из причин снижения износа композиции при их добавлении в матрицу. Также частицы, обладая развитой поверхностью и, как следствие, высокой поверхностной энергией, в процессе трения образуют ячеистую структуру на поверхности трения.

В третьей главе выполнены комплексные металлофизические и трибологические исследования нитридных ионно-плазменных покрытий систем TiAlN и CrAlSiN. Для получения покрытий была использована вакуумная установка PLATIT π^{80} . Режим испарения – дуговой двухкатодный раздельный. Осаждение проводилось при температуре 300–450 °С и напряжении смещения 100–150 В в течение 30–180 мин в зависимости от толщины и архитектуры покрытия. Перед формированием основного покрытия на очищенную ионным пучком поверхность образца наносили подслои титана (для покрытий TiAlN) или хрома (для покрытий CrAlSiN) с целью повышения адгезии покрытия.

В качестве подложек для нанесения покрытий использовались конструкционные стали: 12Х2Н4А с бейнитной структурой и цементованной поверхностью, а также 38ХМЮА с сорбитной структурой и азотированной поверхностью. Выбор этих сталей в качестве подложек обусловлен их широким использованием в нагруженных трибосопряжениях транспортного машиностроения – зубчатых и червячных передачах, шлицевых муфтах и т.п. Применение в качестве подложек для ионно-плазменных покрытий цементованной и азотированной поверхностей практически не изучено с точки зрения адгезии таких покрытий.

Для исследования были выбраны ионно-плазменные покрытия систем TiAlN и CrAlSiN благодаря возможности получения в них различных вариантов структуры и исследования влияния структурного фактора на свойства покрытий. В покрытия TiAlN были реализованы монослойная (1D) и многослойная (2D-композит) конфигурации структуры с изменяемой толщиной слоев, а также с постоянной и градиентной концентрацией элементов. В среднем распределение элементов в составе покрытий составляло Ti:Al:N = 25:25:50 (в ат.%). Для получения в покрытии пространственной гетерофазной структуры типа 3D-композита была использована система CrAlSiN. Её выбор обусловлен тем, что фазовая диаграмма системы Cr-Al-Si-N содержит большое количество устойчивых бинарных соединений, которые не растворяются друг в друге, как, например, нитриды Si₃N₄ и AlN. Типология структур включала 4 «архитектурных» типа: монослойные, многослойные и пространственные гетерофазные структуры, причем многослойные покрытия представлены покрытиями с толщиной слоев 150–200 нм (толстослойные) и 30–60 нм (тонкослойные). Некоторые из них приведены на рис. 4. Если в покрытиях системы TiAlN распределение элементов в покрытии вполне предсказуемо и в пределах слоя может считаться однородным, соответствующим TiN или AlN, то в гетерофазном покрытии системы CrAlSiN степень неоднородности состава по толщине покрытия можно определить только весьма тонкими методами. Для этого было проведено исследование покрытия CrAlSiN методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) с помощью системы анализа поверхности SPECS (Германия). Система SPECS обеспечивает возможность послойного

ионного профилирования (распыления, стравливания) поверхности и получения спектров на каждой глубине покрытия.

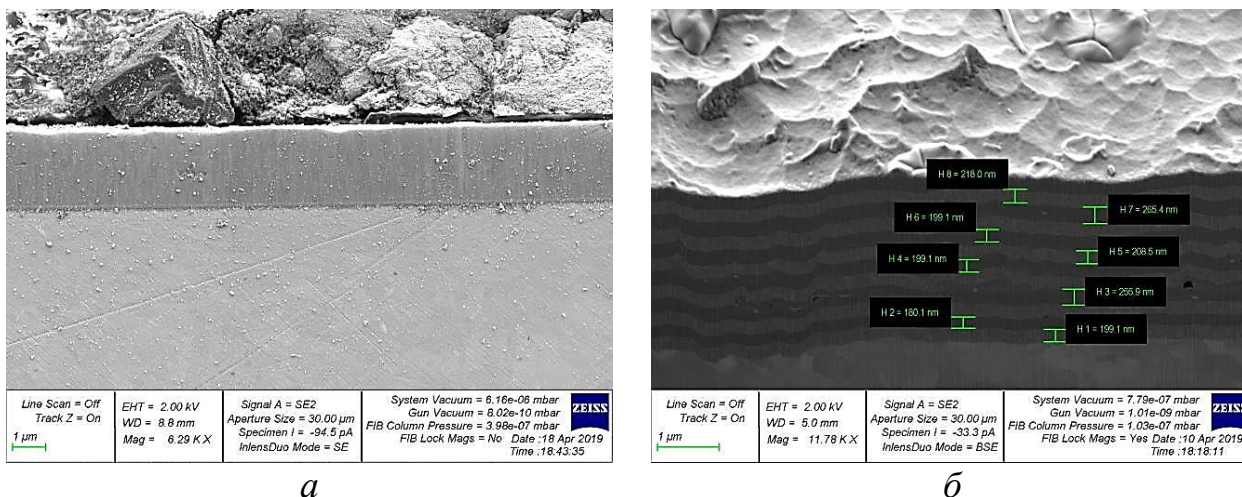


Рис. 4. Структура нитридного покрытия TiAlN в поперечном сечении, SEM: *a* – микрошлиф монослойного покрытия; *б* – кросс-секция FIB многослойного покрытия с «толстыми» слоями

Полученные спектры при помощи встроенного программного обеспечения системы SPECS могут быть разложены на составляющие, каждая из которых характеризует индивидуальную специфическую химическую связь атомов элемента, обнаруженного на исследуемой поверхности, что фактически эквивалентно фазовому составу покрытия. Покрытие имело толщину примерно 1 мкм. Скорость травления составила $\sim 1,85 \text{ \AA/с}$. Ионное профилирование продолжалось до появления атомов железа, то есть до достижения поверхности стальной подложки. На рис. 5 показаны результаты аналитической обработки спектров в виде распределения химически активных электронных конфигураций элементов (т.е. их химических связей) по глубине покрытия CrAlSiN, по которым можно делать выводы о фазовом составе покрытия. В слое толщиной $\sim 300\text{--}600 \text{ нм}$ происходит перераспределение концентраций O, N и Al. Начиная со времени травления 30 мин концентрации атомов O и N ведут себя антибатно: содержание кислорода уменьшается от поверхности в глубь, а азота – увеличивается. В слое толщиной $\sim 200 \text{ нм}$, что соответствует времени травления 10–30 мин, концентрация атомов Cr уменьшается и происходят изменения в форме его тонкой структуры (электронных конфигураций). Начиная с этого времени хром находится в соединении с азотом. Причем исходя из распределения Cr, Al и N по глубине покрытия количество нитрида Cr по глубине убывает, а количество нитрида Al в той же пропорции возрастает (рис. 5). Поверхностный же слой покрытия (до глубины 100–200 нм) насыщен оксидами (преимущественно Cr_2O_3). Единственный элемент, содержание которого по глубине покрытия остается достаточно стабильным, – это кремний. В равновесной системе CrAlSiN он обычно находится в виде нитридной фазы Si_3N_4 . Таким образом, полученные результаты РФЭС показывают, что распределение элементов (Cr, Al, N, O) и фаз (CrN, AlN) по глубине покрытия CrAlSiN неоднородно.

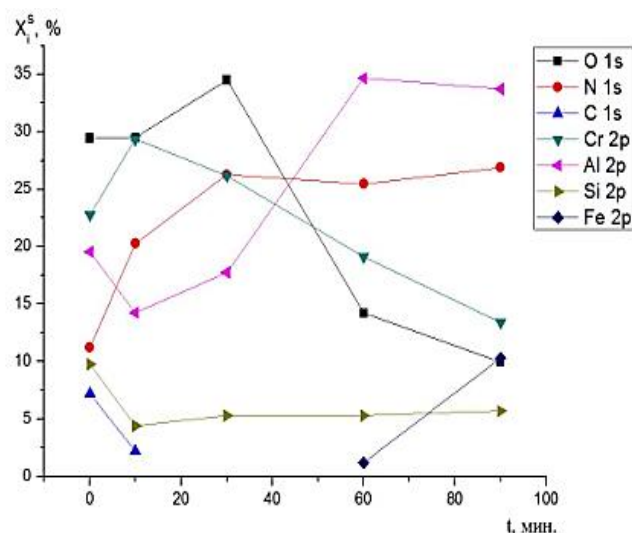


Рис. 5. Результаты ионного (Ar^+) профилирования в виде концентрационных кривых распределения элементов от времени, что соответствует распределению по глубине покрытия $CrAlSiN$

Физико-механические характеристики покрытий (модуль упругости E и твердость H) определялись с использованием установки Nanotest-600 по методу непрерывного индентирования. На основе полученных экспериментальных значений E и H выполнялся расчет соотношений H/E и H^3/E^2 . Полученные результаты для различных типов структуры исследованных ионно-плазменных покрытий сведены в табл. 1.

В качестве эталона для сравнительного анализа полученных данных использовались аналогичные механические свойства поверхностных слоев подложек (без покрытий):

1) сталь 38X2MЮА с азотированным поверхностным слоем: $E = 241$ ГПа; $H = 12$ ГПа; $H/E = 0,0498$; $H^3/E^2 = 0,02975$ ГПа;

2) сталь 12X2Н4А с цементованным поверхностным слоем: $E = 200$ ГПа; $H = 6,42$ ГПа; $H/E = 0,0321$; $H^3/E^2 = 0,0066$ ГПа.

Результаты, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о целесообразности выбора покрытий $TiAlN$ и $CrAlSiN$, поскольку их прочностные характеристики существенно выше, чем аналогичные свойства подложек. Необходимость использования двух значений нагрузок при индентировании 10 и 100 мН обусловлена потребностью выделения из массива полученных данных влияния подложки на свойства покрытий. Данные, полученные при нагрузке 100 мН, характеризуют влияние подложки, которое наиболее существенно в случае покрытий малой толщины.

Данные измерений (см. табл. 1) показывают, что многослойное покрытие в целом имеет более высокий комплекс механических характеристик. При этом снижение толщины отдельных слоев в покрытии $TiAlN$ в целом ведет к повышению его прочности. Наиболее сильную зависимость от толщины слоев проявляет величина сопротивления пластической деформации H^3/E^2 , что характеризует её как наиболее структурно чувствительную механическую характеристику. Причем максимальные значения сопротивления пластической деформации H^3/E^2 имеет наноструктурированное гетерофазное покрытие $CrAlSiN$.

Таблица 1 – Обобщенные данные физико-механических характеристик образцов с вакуумными ионно-плазменными покрытиями нитридных систем

Образец	Нагрузка P , мН	Твердость H , ГПа	Модуль упругости E , ГПа	H/E	H^3/E^2
38X2MЮА + TiAlN (монослойное)	100	26,0	281,4	0,0920	0,2555
	10	24,7	314,3	0,0802	0,1935
38X2MЮА + TiAlN (мно- гослойное толстослойное)	100	26,3	287,0	0,0943	0,2854
	10	25,0	261,1	0,0958	0,2022
38X2MЮА + TiAlN (мно- гослойное тонкослойное)	100	24,9	247,0	0,1007	0,2548
	10	28,8	288,1	0,1067	0,2773
38X2MЮА + CrAlSiN (гетерогенная)	100	20,4	225,5	0,0913	0,1719
	10	22,8	259,7	0,0878	0,2863
12X2H4А + TiAlN (монослойное)	100	14,2	219,5	0,064	0,0697
	10	25,5	316,1	0,081	0,1660
12X2H4А + TiAlN (мно- слойное толстослойное)	100	14,2	207,9	0,0683	0,0681
	10	25,3	257,7	0,0982	0,2438
12X2H4А + TiAlN (мно- слойное тонкослойное)	100	22,2	229,6	0,0940	0,2273
	10	25,2	291,0	0,0860	0,1918
12X2H4А + CrAlSiN (гетерогенная)	100	12,4	203,1	0,0620	0,0505
	10	24,1	251,3	0,0959	0,2885

Триботехнические свойства исследуемых ионно-плазменных покрытий определяли при испытаниях на машине трения TRB (CSM Instruments, Швейцария). Испытания проводились по схеме «штифт – пластина» при нагрузке 10 Н и возвратно-поступательном движении образца с амплитудой 800 мкм и частотой 10 Гц. Контртелом служил шарик из сплава типа ВК (WC+Co) диаметром 6,35 мм, жестко закрепленный в штифте, поэтому испытания относятся к типу трения скольжения. Продолжительность испытания – 50 тыс. циклов. Определяемые трибологические свойства покрытий (коэффициент трения μ , интенсивность объемного износа образца J и контртела J_K) приведены в табл. 2.

Проведенные испытания позволяют сделать качественные выводы о том, что покрытия системы TiAlN, независимо от типа структуры, трибологические характеристики образцов не улучшают. Тогда как использование покрытий CrAlSiN с гетерогенной структурой на подложке любого типа обеспечивает значительное уменьшение износа J и J_K , при этом коэффициент трения μ у покрытий системы CrAlSiN остается достаточно высоким.

Для более глубокого понимания трибологических особенностей покрытий были исследованы механизмы их износа на основе изучения дорожек трения покрытий TiAlN и CrAlSiN (рис. 6) с использованием методик SEM и EDAX.

При одинаковом числе циклов испытаний дорожка трения TiAlN на рис. 6, а на 60 % изношена и покрыта хрупкой пленкой окиси железа FeO, тогда как на дорожке трения CrAlSiN покрытие почти полностью сохранено (рис. 6, б). Анализ показал, что определяющее значение для работоспособности покрытий TiAlN и

CrAlSiN в условиях сухого трения имеют механизмы изнашивания. В силу невысокой стойкости к окислению покрытия системы TiAlN в условиях проведенных трибологических испытаниях разрушались по окислительному механизму износа, тогда как покрытия системы CrAlSiN – по усталостному. Физико-механические свойства и структура покрытий также имеют определенное влияние на износостойкость, как, например, в случае наноструктурированного покрытия системы CrAlSiN. Но при определенных условиях это влияние может полностью подавляться доминированием других факторов, например, при окислительном износе покрытий системы TiAlN.

Таблица 2 – Трибологические свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий нитридных систем с различными типами структуры

Образец	Коэффициент трения μ	Интенсивность износа образца $J, 10^{-7} \text{ мм}^3/\text{Н/м}$	Интенсивность износа контртела $J_K, 10^{-7} \text{ мм}^3/\text{Н/м}$
38X2MЮА (азотирование)	0,528	4,50	3,96
38X2MЮА + TiAlN (монослойное)	0,634	16,00	6,87
38X2MЮА + TiAlN (многослойное толстослойное)	0,690	13,84	7,70
38X2MЮА + TiAlN (многослойное тонкослойное)	0,742	13,83	6,19
38X2MЮА + CrAlSiN (гетерогенная)	0,602	1,68	1,27
12X2H4А (цементация)	0,901	12,30	4,46
12X2H4А + TiAlN (монослойное)	0,756	12,91	4,79
12X2H4А + TiAlN (многослойное толстослойное)	0,722	10,60	4,64
12X2H4А + TiAlN (многослойное тонкослойное)	0,754	15,65	7,38
12X2H4А + CrAlSiN (гетерогенная)	0,820	0,79	1,66

Экспериментальные трибологические данные показывают, что применение износостойких ионно-плазменных покрытий нитридных систем, независимо от их состава и структуры, не обеспечивает снижение коэффициента трения в условиях сухого трения. Эта проблема может быть решена, например, путем использования различного рода смазочных материалов или антифрикционных трибокомпозиций, в состав которых входит покрытие. Для этого необходимы данные об адсорбционных свойствах покрытий. Поэтому в заключительной части главы 3 проведено изучение адсорбционных свойств ионно-плазменного покрытия CrAlSiN (нанесенного на азотированную поверхность стали 38ХМЮА) по отношению к различным адсорбатам, что позволит произвести целенаправленный подбор наиболее

эффективных присадок к смазочному материалу для максимального снижения коэффициента трения покрытия.

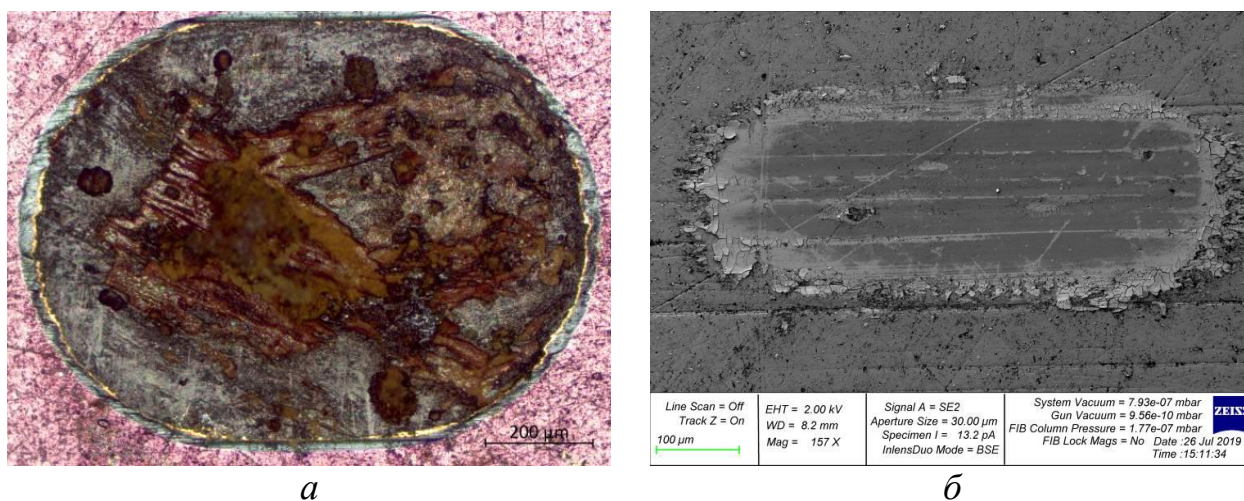


Рис. 6. Оптическая (а) и сканирующая электронная (б) микроскопия дорожек трения на поверхности образцов стали 38X2МЮА с покрытиями TiAlN (а) и CrAlSiN (б)

Исследования лабораторных образцов с покрытиями проведены методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье по методу нарушенного полного внутреннего отражения (ИК-фурье-спектроскопии НПВО). С целью подбора наиболее эффективных присадок к смазочному материалу при использовании в трибоконтакте ионно-плазменных покрытий в качестве адсорбатов изучены электронодонорные (аммиак NH_3), электроноакцепторные (монооксид углерода CO) и слабополярные (этиловый спирт $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) молекулы. Выполненные исследования показали, что ионно-плазменные покрытия системы CrAlSiN способны адсорбировать электронодонорные соединения. Поэтому применение серосодержащих присадок для модифицирования трансмиссионного масла позволит добиться эффективного взаимодействия между покрытием на поверхности трибоконтакта и смазочным материалом, образования наиболее прочных граничных слоев и повышения эксплуатационных свойств трибосопряжения. Также экспериментально показано, что адсорбирование полярных молекул антифрикционных присадок на поверхности покрытия CrAlSiN происходит по механизму многослойной адсорбции.

Четвертая глава диссертации посвящена разработке рекомендаций по повышению износостойкости как металлополимерных, так и металлических тяжело нагруженных трибосистем и управлению их фрикционными свойствами:

– для металлополимерных сопряжений на основе установленных в главе 2 закономерностей по раскрытию кинетики и механизма образования вторичных структур на трибоконтактной поверхности металлического контртела были разработаны полимерные композиционные материалы, позволившие повысить работоспособность такого ответственного узла трения подвижного состава, как «пятник – подпятник»;

– для металлических трибосопряжений основным критерием повышения их износостойкости являются разработка технологии нанесения ионно-плазменных покрытий системы CrAlSiN с гетерофазной наноструктурой, представленных в главе 3, для использования по повышению надежности шлицевого соединения хвостовой трансмиссии вертолета МИ-26М с учетом совместимости этих покрытий и смазочных материалов с нанодобавками.

Исходя из сказанного разработаны, изготовлены и проведены стендовые испытания, максимально приближенные к условиям эксплуатации трибосопряжений «пятник – подпятник» и муфт трансмиссии вертолета.

Результаты стендовых испытаний узла «пятник – подпятник»

Улучшение эксплуатационных свойств пятникового узла достигнуто за счет применения разработанного и представленного в главе 2 модифицированного композиционного материала на основе полимера в составе пластины-прокладки, укладываемой в пятник надрессорной балки.

Для исследования модифицированных полимерных композитов изготовлены прокладки в виде стальных дисков диаметром 300 мм и толщиной 8 мм. В диске высверлены отверстия диаметром 10 мм и глубиной 4 мм, в которые запрессовывались исследуемые композиции. По результатам проведенных стендовых испытаний, имитирующих условия груженого вагона при прохождении кривых участков пути, и оценки коэффициента трения установлено, что наилучшие результаты показали стальные прокладки со вставками: фенилон С-2 + фторопласт-4МБ (10 %) + арамид-Т (5 %) + шпинель (3 %), обеспечивающими коэффициент трения 0,2 в течение 20 часов эксперимента.

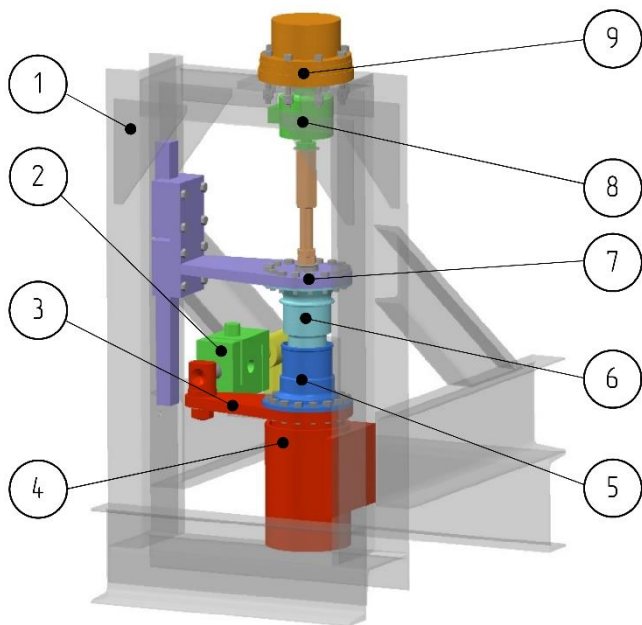


Рис. 7. Схема испытательного стенда, имитирующего работу трансмиссионного шлицевого соединения:

- a* – схема; *б* – общий вид;
1 – станина; 2 – тензорезисторный датчик С2Н-10-С3; 3 – рычаг;
4 – шпиндель; 5 – образец-стакан;
6 – образец-наконечник; 7 – поводок;
8 – тензорезисторный датчик U2В/50KN; 9 – гидроцилиндр

Оценка трибологических свойств ионно-плазменного покрытия шлицевого соединения муфты трансмиссии вертолета МИ-26, работающей в режиме граничного трения

На разработанном и изготовленном стенде были проведены испытания заводских шлицевых муфт и муфт с покрытием CrAlSiN по технологии, разработанной и представленной в главе 3, с использованием стандартного и модифицированных масел. На испытательном стенде были созданы условия, максимально приближенные к условиям эксплуатации муфт трансмиссии вертолета (рис. 7).

Испытания проводились при возвратно-поступательном движении наконечника относительно неподвижного стакана с частотой 50 Гц, амплитудой 100 мкм и при нормальной нагрузке 24 300 Н, при наличии смазочного материала. Продолжительность испытания составила 500 000 циклов.

В результате проведенных испытаний установлено, что применение покрытия системы CrAlSiN в сочетании с модифицированными смазочными материалами дает снижение коэффициента трения в установившемся режиме, а также способствует повышению износостойкости в 2 раза.

Заключение

Основные выводы

1. На основе анализа проведенных исследований металлополимерных и металлических трибосистем с позиций структурной приспособляемости (СП) трущихся сопряжений с образованием вторичных структур, локализуемых в тонком поверхностном слое, разработаны научно-теоретические и практические перспективные технологические способы повышения износостойкости и долговечности тяжело нагруженных узлов трения:

- для металлополимерных трибосистем путем формирования вторичных структур на поверхности трения;
- для металлических трибосопряжений путем ионно-плазменного напыления с учетом совместимости этих покрытий и смазочных материалов с нанодобавками.

2. Установлен механизм формирования вторичных поверхностных структур в процессе трения «металл – полимер», и на этой основе разработаны методы модифицирования полимеров, наполнителей и наноразмерных добавок в них. Введение наполнителей – аримида-Т, фторопласта-4МБ, шпинели – в матрицу фенилона С-2 в определенных пропорциях значительно повышает износостойкость и способствует снижению коэффициента трения в 2 раза по сравнению с немодифицированным.

3. Показано, что только поверхности с шероховатостью $R_a \leq 0,12$ мкм и $R_z \leq 0,6$ мкм (не ниже 10-го класса шероховатости) обеспечивают качественное осаждение тонких вакуумных ионно-плазменных покрытий, обладающих высокой износостойкостью.

4. Экспериментально доказано, что толщина покрытия оказывает влияние на его износостойкость. Для гетерофазных покрытий системы CrAlSiN в качестве оптимальной толщины при использовании в тяжело нагруженных трибосопряжениях принято эмпирическое значение $1,0 \pm 0,2$ мкм. Износостойкость покрытия при малой его толщине объясняется пассивацией границы раздела «покрытие – подложка» сегментами краевых дислокаций, которые в тонкой пленке играют роль

дислокаций несоответствия. При таком граничном механизме связывания (торможения) дислокаций для их скольжения вдоль покрытия требуются напряжения, обратно пропорциональные толщине пленки.

5. Установлено, что при граничном трении покрытия системы CrAlSiN минимизация коэффициента трения достигается путем применения серосодержащих присадок для модифицирования смазочных материалов, так как ионно-плазменные покрытия системы CrAlSiN способны хорошо адсорбировать электронодонорные соединения.

6. С учетом установленных закономерностей образования вторичных поверхностных структур на трибоконтактной поверхности металлополимерного трибосопряжения сформулированы рекомендации модифицирования полимеров, наполнителей и наноразмерных добавок в них. Осуществлена широкая стендовая проверка полученных полимерных композиционных материалов в тяжелонагруженном узле трения подвижного состава – «пятник – подпятник» и приняты решения к их внедрению на Северо-Кавказской железной дороге.

Практические результаты работы также включают проверку научных исследований по разработке технологий и новых материалов для формирования ионно-плазменных износостойких покрытий, совместимых с составом смазочного материала, работающих в шлицевом соединении хвостовой трансмиссии вертолета МИ-26М. На основе разработанной технической и нормативной документации осуществлена широкая опытно-стендовая проверка на заводе ПАО «Роствертол», получившая положительные рекомендации по повышению износостойкости и надежности работы данного сопряжения.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме диссертации

Установленные закономерности кинетики и механизма формирования вторичных поверхностных структур не только открывают большие возможности по созданию нового класса композиционных самосмазывающихся полимерных материалов, но и могут служить основой для разработки технических принципов повышения эффективности широкого класса смазочных материалов за счет формирования на поверхности трения вторичных поверхностных структур.

Разработанные в диссертации принципы совместимости компонентов нанесенных тонких износостойких ионно-плазменных покрытий трибоповерхности с составом смазочного материал, являются перспективной основой их применения в узлах трения подъемно-транспортных, строительных и других машин.

Основные публикации по теме диссертации.

По диссертации опубликовано 36 работ. Приведем основные.

I. Публикации в центральных изданиях, включенных в перечень периодических изданий ВАК РФ, международные базы данных и систем цитирования – 13 работ

1. Трибологическое применение наночастиц, полученных с помощью бисерных мельниц / А.В. Смелов, Н.А. Мясникова, **Д.С. Мантуров**, Н.И. Никульшин // Вестник РГУПС. – 2012. – № 4. – С. 7–11.

2. Исследование трибологических характеристик полимерных гибридных нанокompозитов, используемых в качестве покрытий в узлах трения / В.И. Колесников, А.И. Буря, **Д.С. Мантуров** [и др.] // Вестник РГУПС. – 2014. – № 2. – С. 12–15.

3. Kolesnikov, I.V. Frictional transfer and the self-organization phenomenon in the friction / I.V. Kolesnikov, **D.S. Manturov** // 13th International Conference on Films and Coatings // Journal of Physics: Conf. Series 857, 2017. – P. 197–200.

4. Экспериментальное изучение свойств смазочных композиций с присадками на основе фосфоровольфрамов / Н.А. Мясникова, **Д.С. Мантуров**, К.С. Лебединский [и др.] // Вестник РГУПС. – 2018. – № 1. – С. 21–27.

5. Tribological and Physicomechanical Properties of Oil-Filled, Phenilon-Based Composites / V.I. Kolesnikov, N.A. Myasnikova, Ph. V. Myasnikov, **D.S. Manturov** [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2018. – Vol. 39, No. 5. – P. 365–370.

6. Study of physical, mechanical and tribological properties of nanocomposites based on oil-filled polymers / P.G. Ivanochkin, S.A. Danilchenko, E.S. Novikov, **D.S. Manturov** [et al.] // Advanced Materials. Springer Proceedings in Physics. – 2018. – Vol. 207. – P. 469–478.

7. The study of tribological properties of composites based on phenylone and hybrid filler / I.V. Kolesnikov, N.A. Myasnikova, **D.S. Manturov** [et al.] // Advanced Materials. Springer Proceedings in Physics. – 2018. – Vol. 207. – P. 479–485.

8. Влияние физико-химических свойств и структуры наноприсадок на основе фосфоровольфрамов на формирование поверхностей трения / С.Ф. Ермаков, Д.Н. Шишияну, К.И. Карпенко, Н.А. Мясникова, **Д.С. Мантуров** // Вестник РГУПС. – 2019. – № 1. – С. 21–27.

9. Study of the phase composition and tribological properties of carbon tool steels after laser surface hardening by quasi-CW fiber laser / A.V. Sidashov, A.T. Kozakov, **D.S. Manturov** [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 15 March 2020. – Vol. 385. – P. 125427.

10. Technologies for Improving the Wear Resistance of Heavily Loaded Tribosystems and Their Monitoring / V.I. Kolesnikov, V.D. Vereskun, **D.S. Manturov** [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2020. – Vol. 41. – P. 169–173.

11. Determining Friction Coefficient at Run-In Stage and Diagnosing the Point of Transition to Steady-State Phase Based on Acoustic Emission Signals / S.I. Builo, V.D. Vereskun, V.I. Kolesnikov, **D.S. Manturov** [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2020. – Vol. 56. – P. 41–48.

12. Структурные аспекты износостойкости вакуумных ионно-плазменных покрытий / В.И. Колесников, О.В. Кудряков, **Д.С. Мантуров** [и др.] // Физ. мезомех. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 62–77.

13. **Мантуров, Д.С.** Методы повышения износостойкости металлополимерных и металлических трибосистем / Д.С. Мантуров // Вестник РГУПС. – 2020. – № 2. – С. 15–24.

II. Патенты

14. Пат. 2479455 Российская Федерация. Способ рельсосмазывания / В.В. Шаповалов, А.М. Лубягов, А.П. Павлов. – № 2011114662/11 ; опубл. 20.04.2013.

15. Пат. 2592651 Российская Федерация. Способ упрочнения поверхности стального колеса железнодорожного транспорта / И.В. Колесников, Ю.Ф. Мигаль, Д.С. Мантуров, А.А. Сычев, В.В. Бардушкин. – № 2015102036/02 ; опубл. 23.01.2015.

III. Публикации в других изданиях – всего 21.

16. Мантурова, Е.А. Применение наноматериалов и нанофункциональных присадок в перспективных технологиях лубрикации контакта гребня колеса с боковой поверхностью головки рельса / Е.А. Мантурова, **Д.С. Мантуров** // Сб. науч.-исслед. работ финалистов конкурса аспирантов и молодых ученых в области энергосбережения в промышленности. – Новочеркасск : Лик, 2010. – С. 249–252.

17. Метод оценки трибологических характеристик наноструктурированного смазочного материала / В.М. Кутняхов, Е.А. Мантурова, **Д.С. Мантуров** [и др.] // Сб. докл. Междунар. конф. «Механика и трибология транспортных систем» (МехТрибоТранс-2011). – Ростов н/Д, 2011. – С. 286–288.

18. Разработка наноструктурированного смазочного материала / Е.А. Мантурова, В.В. Шаповалов, **Д.С. Мантуров** [и др.] // Сб. докл. Междунар. конф. «Механика и трибология транспортных систем» (МехТрибоТранс-2011). – Ростов н/Д, 2011. – С. 302–304.

19. **Мантуров, Д.С.** Управление трением между поверхностями катания колес локомотива и рельса при вписывании в кривые / Д.С. Мантуров // Труды Всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2012». Ч. 2. – Ростов н/Д, 2012. – С. 327–329.

20. Разработка опытной технологии нанесения многослойного антифрикционного покрытия / Н.И. Никульшин, Д.С. Калинин, **Д.С. Мантуров** [и др.] // Труды Всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2012». Ч. 2. – Ростов н/Д, 2012. – С. 330–332.

21. Эксплуатационные испытания многослойного наномодифицированного антифрикционного покрытия / Ю.В. Жукова, П.Г. Иваночкин, **Д.С. Мантуров** [и др.] // Сб. тр. конф. «Наука, техника и высшее образование: проблемы и тенденции развития». – Ростов н/Д, 2012. – № 5. – С. 85–90.

22. **Мантуров, Д.С.** Функциональные наноструктурированные покрытия триботехнического назначения. Фрикционные характеристики / Д.С. Мантуров, Н.И. Никульшин, А.В. Смелов, // Труды Всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2013». Ч. 3. – Ростов н/Д, 2013. – С. 282–284.

23. Иваночкин, П.Г. Использование электромеханической обработки для модифицирования поверхностей, нанесённых методом электродуговой металлизации / П.Г. Иваночкин, Н.А. Мясникова, **Д.С. Мантуров** // Новые материалы и технологии в машиностроении. – Брянск, 2014. – № 12. – С. 172.

24. Влияние наномодифицирования компонентов композита на его фрикционные и износные характеристики / Н.А. Мясникова, Ф.В. Мясников, **Д.С. Мантуров** [и др.] // Труды Междунар. научно-практ. конф. «Транспорт-2014». Ч. 3. – Ростов н/Д, 2014. – С. 221–223.

25. **Мантуров, Д. С.** Применение мультифрактального анализа к исследованию микрорельефа поверхности / Д.С. Мантуров // Труды Междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт-2014». Ч. 3. – Ростов н/Д, 2014. – С. 211–213.

26. Инновационные методы диагностики с учетом поверхностных изменений на контакте / И.В. Колесников, А.В. Сидашов, В.И. Колесников, **Д.С. Мантуров** // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. – М., 2015. – С. 444–446.

27. Влияние нанодобавок на фрикционные характеристики полимерных композитов / **Д.С. Мантуров**, П.А. Кармазин, В.С. Анофриева [и др.] // Труды Междунар. науч.-практ. конф. «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России». – Ростов н/Д, 2015. – С. 67–68.

28. 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, 2015. – С.41–42.

29. **Мантуров, Д.С.** Исследование изменения морфологии поверхности в процессе трения с помощью фрактального анализа / **Д.С. Мантуров** // Труды Междунар. науч.-практ. конф. «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России». – Ростов н/Д, 2015. – С. 229–231.

30. Влияние механоактивации нанонаполнителя на триботехнические свойства композита / П.Г. Ивановкин, Н.А. Мясникова, И.В. Колесников, **Д.С. Мантуров** [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. – 2015. – Т. 17, № 1. – С. 22–26.

31. **Мантуров, Д.С.** Анализ морфологии поверхности материалов на основе фенилона при проведении трибологических испытаний / **Д.С. Мантуров**, К.С. Лебединский, М.С. Куцаева // Труды Междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт-2015». – Ростов н/Д, 2015. – С. 191–193.

32. Анализ морфологии поверхности трения, сформированной под влиянием композиционного материала / **Д.С. Мантуров**, Е.С. Новиков, М.Д. Аникина [и др.] // Труды Междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт-2016». – Ростов н/Д, 2016. – С. 297–299.

33. Зависимость физико-механических свойств фенилона от температурных режимов формирования / Ф.В. Мясников, **Д.С. Мантуров**, С.А. Данильченко, И.В. Колесников // Сборник трудов конференции «Современное развитие науки и техники» («Наука-2017») Т. 1. Технические и естественные науки. – Ростов н/Д, 2017. – С. 251–254.

34. Трибологические и упругие свойства хаотически армированных трибокомпозитов / Ф.В. Мясников, Н.А. Мясникова, **Д.С. Мантуров** [и др.] // Труды Междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт-2018». – Ростов н/Д, 2018. – С. 144–148.

35. Применение модификаторов полиизобутилена для повышения эффективности эксплуатации пластичных смазок / К.Н. Долгополов, Н.А. Мясникова, **Д.С. Мантуров** [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 1. – С. 14.

36. Карпенко, К.И. Исследование трибологических характеристик модифицированного поверхностного слоя стального образца частицами нестехиометрических соединений молибдена и вольфрама методом электроискрового легирования / К.И. Карпенко, А.И. Азоян, **Д.С. Мантуров** // Труды РГУПС. – 2019. – № 4. – С. 77–81.

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. В работах с соавторами личный вклад соискателя заключается в следующем: в работе [1] разработана методика получения наноразмерных частиц; [2, 6] участие в постановке задачи и экспериментальных исследованиях, по результатам исследований проведена оценка основных параметров композита; [3, 7] разработка методики проведения исследований механизма формирования вторичных поверхностных структур; [4, 8] участие в проведении экспериментальных исследованиях смазочных композиций, анализ и сопоставление полученных результатов; [5] разработана технология формирования полимерной композиции; [9, 11] разработка методик и систем мониторинга свойств трибосопряжений, сопровождение экспериментальных исследований модифицированной поверхности; [10, 12] разработана технология для формирования ионно-плазменных износостойких покрытий, выполнены экспериментальные исследования, по результатам исследований проведена оценка основных параметров покрытия; [14, 16, 17, 18, 19] анализ и интерпретация выполненных экспериментальных исследований по влиянию нанofункциональных присадок; [15, 20, 21, 22, 23] разработана технология формирования многослойного антифрикционного покрытия и выполнены эксплуатационные испытания покрытия; [24, 27, 33, 34] обоснования влияния наномодифицирования компонентов и нанодобавок на фрикционные характеристики металлополимерных трибосистем; [26] предложены методики диагностирования поверхности с учетом изменения триботехнических характеристик в зоне контакта; [28, 36] разработка способов упрочнения стланных поверхностей трибоконтакта; [30] установлены влияния механоактивации нанонаполнителя; [31, 32] предложена методика оценки морфологии поверхности трения; [35] установление влияния применения модификаторов к пластичным смазочным материала на эксплуатационные характеристики трибосистемы.

Мантуров Дмитрий Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
И МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ
ПУТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
ИХ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

Подписано в печать 14.10.2020. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,39.
Тираж 100 экз. Заказ № 10794.

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

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