

На правах рукописи



ПОЧЕС НИКИТА СЕРГЕЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РЕЗЬБЫ ЛЕГКОСПЛАВНЫХ
НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ
ФОРМИРОВАНИЕМ МДО-ПОКРЫТИЙ И ПРИМЕНЕНИЕМ
СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 2.5.3. Трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва
2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»).

Научный руководитель: Малышев Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»

Официальные оппоненты: Поляков Сергей Андреевич, доктор технических наук, профессор кафедры РКЗ «Основы конструирования машин» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (НИУ)»

Хопин Петр Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (НИУ)»

Ведущее предприятие: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН), г. Москва

Защита состоится «20» июня 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 44.2.005.01 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, конференц-зал А 230.

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.rgup.ru](http://www.rgup.ru).
Автореферат разослан «__» апреля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 44.2.005.01
доктор технических наук, профессор



П.Н. Щербак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Насосно-компрессорные трубы (НКТ) являются наиболее распространенным видом трубной продукции в нефтегазовой отрасли. Их применение при добыче нефти и газа сопровождается многочисленными операциями свинчивания-развинчивания и требует применения специальных резьбовых смазок на минеральной основе. Ежегодный объем НКТ, потребляемый нефтегазовыми компаниями в России, составляет 350 тыс. тонн.

Наиболее распространенными причинами аварий стальных НКТ является коррозия, износ резьбы и усталость металла. Уже после 5-7 циклов свинчивания-развинчивания НКТ требуется проводить ремонт резьбовой части трубы. Средний срок их службы на предприятиях РФ и СНГ составляет 3 года.

Применение легкосплавных НКТ на базе алюминиевых сплавов является инновационным решением сразу нескольких актуальных задач. В первую очередь интерес представляет высокая коррозионная стойкость такого вида труб, особенно при добыче нефти и газа в осложненных условиях с агрессивной средой, содержащей сероводород и углекислый газ. Кроме того, легкосплавные насосно-компрессорные трубы позволяют снизить вес лифтовых колонн, вследствие чего снижаются затраты на проведение спускоподъемных операций и снижаются требования к оборудованию для их реализации. Однако, при всех преимуществах применения легкосплавных НКТ из алюминиевых сплавов, их внедрение в отрасль тормозится низкой износостойкостью резьбовых соединений, вследствие действия значительных нагрузок при проведении операций сборки-разборки эксплуатационных колонн НКТ. Применение МДО-покрытий является перспективным методом решения данной проблемы.

Исследование работоспособности резьбового соединения НКТ с МДО-покрытием невозможно без учета вклада в процесс свинчивания-развинчивания смазочного материала. Применяемые в настоящее время для сборки НКТ резьбовые смазки типа «РУСМА-1» (по ТУ 0254-001-46977243-2002) имеют минеральную основу и не всегда соответствуют заявленным требованиям. Кроме того, период биологического разложения таких масел весьма значителен, что усиливает экологическую нагрузку, учитывая какой объем смазки идет для операций свинчивания-развинчивания. Поэтому использование смазочных материалов на экологически безопасной основе, с периодом биоразложения менее года, обеспечит работоспособность резьбового соединения и улучшит экологическую обстановку. Исследование триботехнических характеристик пар трения с МДО-покрытиями при работе с применением экологических смазочных материалов позволит ускорить внедрение в отраслевую практику легкосплавных НКТ, что определило актуальность данной работы.

Степень разработанности темы. Изучению МДО-покрытий посвящено значительное количество работ. Среди основоположников данного метода следует отметить научные группы и коллективы, работающие в Новосибирске (ИНХ СО РАН - Марков Г.А., Терлеева О.П.), Владивостоке (ИХ ДВО РАН - Руднев В.С., Гордиенко П.С., Гнеденков С.В.), Москве (НИТУ МИСиС – Ракоч

А.Г., Тимошенко А.В, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина – Федоров В.А., Малышев В.Н., и др.), Уфе (УУНиТ – Парфенов Е.В., Дударева Н.Ю.), Костроме (КГТУ – Белкин П.Н., Кусманов С.А.) и др., а также ряд зарубежных коллективов и организаций (Sheffield University – Yerokhin A.L., Keronite, (UK), Ceratronic (France), Kepla-Coat/Magoxid-Coat (Germany), Tagnite (USA).

Однако применение МДО-покрытий для резьбовых соединений НКТ до настоящего времени практически не исследовалось. Тяжелые условия работы эксплуатационной колонны НКТ характеризуются применением значительных моментов свинчивания, которые для алюминиевых сплавов с МДО – покрытиями представляют существенную нагрузку. В связи с чем, исследования работоспособности и изучение триботехнических характеристик таких покрытий в условиях эксплуатации НКТ, является востребованным и весьма актуальным.

Целью диссертационной работы является повышение износостойкости и антифрикционных свойств резьбовых соединений легкосплавных НКТ посредством формирования МДО-покрытий в условиях работы в парах трения разного материального исполнения и применением экологических смазочных материалов.

Для выполнения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Провести анализ современных тенденций триботехнического материаловедения и оценить возможность применения экологически безопасных смазочных материалов в парах трения с МДО-покрытиями.

2. Определить триботехнические характеристики покрытий, сформированных методом МДО, при трении скольжения в экологических смазочных материалах.

3. Разработать метод формирования новых керамо-полимерных покрытий, состоящих из оксидной матрицы и включений фторопласта, посредством микродугового оксидирования.

4. Исследовать триботехнические характеристики новых керамо-полимерных покрытий при трении в экологических маслах.

5. На основе полученных данных дать рекомендации о возможности применения МДО-покрытий для резьбовых соединений легкосплавных НКТ с использованием экологических смазочных материалов.

Объектом исследований настоящей работы являются резьбовые соединения инновационных легкосплавных насосно-компрессорных труб, упрочненные МДО-покрытиями в сочетании с экологическими смазочными материалами.

Предметом исследования являются покрытия, формируемые методом МДО, для резьбовых соединений легкосплавных НКТ и оценка их триботехнических характеристик в парах трения разного материального исполнения при смазке экологическими смазочными материалами.

Научная новизна работы:

1. Впервые выполнен комплекс сравнительных исследований триботехнических характеристик МДО-покрытий в экологических смазочных материалах на основе полиэтиленгликоля (ПЭГ), полиальфаолефинов (ПАО), кремниевого (силиконового) масла (КМ), диизотридецил адипата (ДИТА) и перфторированного полиэфира (ПФПЭ).

2. Установлены предельные (критические) величины удельной нагрузки для МДО-покрытий, сформированных на алюминиевых сплавах Д16 и В95, при трении по схеме «шар-диск» в паре со сталью 100 Cr6 (аналог ШХ15) в условиях смазки контакта экологическими маслами - до 260 МПа, за исключением масла ПЭГ (210 МПа).

3. Показано, что триботехнические характеристики пары трения «МДО-покрытие – сталь ШХ15» в экологических маслах формируются комплексным взаимодействием состава МДО-покрытия и смазочной среды. Наиболее высокие значения триботехнических характеристик показали МДО-покрытия, сформированные на сплаве В95, с маслом на основе диизотридецил адипата (ДИТА).

4. Показано, что изменение коэффициентов трения и линейных скоростей изнашивания, в зависимости от контактного давления, для пар трения «МДО-покрытие – сталь ШХ15» в экологических маслах характеризуются экспоненциальными зависимостями. При этом значения коэффициентов трения при повышении контактного давления имеют тенденцию к уменьшению, а скоростей изнашивания – к увеличению своих значений.

5. Установлено, что керамо-полимерные покрытия с включениями частиц фторопласта, при испытаниях по схеме трения «кольцо-кольцо» показали: снижение износа от 31 до 47,5% в парах «МДО-покрытие – сталь» и снижение величины коэффициента трения от 15,8 до 46,9% в парах трения «МДО-МДО».

Теоретическая значимость работы заключается в корректном научном обосновании установленных экспериментально данных триботехнических характеристик (коэффициента трения и износостойкости) МДО-покрытий, сформированных на сплавах алюминия Д16 и В95, при трении в экологически безопасных смазочных материалах и особенностей кинетики их изменений в зависимости от контактного давления.

Практическая значимость:

1. Разработана технология формирования керамо-полимерных покрытий на вентильных металлах и их сплавах с включением частиц фторопласта в основной рабочий слой, которая позволяет улучшить их антифрикционные свойства и износостойкость (технология защищена патентом РФ № 2787330).

2. Разработаны практические рекомендации по применению разработанной технологии формирования антифрикционных керамо-полимерных МДО-покрытий для резьбовых соединений НКТ.

3. Результаты исследования использованы при выполнении научно-исследовательской работы на тему «Минеральные покрытия резьб НКТ» в рамках проекта А220003057 ПАО «Газпром нефть»

4. Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе при изучении курсов «Триботехническое материаловедение» и «Фрикционное и антифрикционное материаловедение».

Методология и методы исследований. В диссертации использовалась современная инструментальная база, включающая как стандартизированное оборудование – машина трения SRV (испытания по стандарту ASTM G133-02 по схеме «шар-диск»), машина трения оригинальной конструкции РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (испытания по стандарту ASTM G99-04 по схеме «штифт-диск»), машина трения МТ-393 (испытания по схеме «кольцо-кольцо»), так и специализированное и стендовое оборудование. Общая методология исследований заключалась в поэтапном изучении триботехнических характеристик МДО-покрытий, сформированных на сплавах Д16 и В95, при трении в экологически безопасных смазочных материалах. В работе использован системный подход, включающий экспериментальное определение триботехнических характеристик, получение на их основе расчетных зависимостей и последующей проверке их адекватности путем проведения модельных и натурных экспериментов.

При этом применяли следующие методы исследования: растровая электронная микроскопия, EDS-анализ, 3D-микроскопия, а также некоторые другие известные методы материаловедения и физической химии, регламентируемые соответствующими государственными стандартами.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных триботехнических исследований МДО-покрытий в различных схемах трения: шар-диск, штифт-диск, кольцо-кольцо при трении по конструкционной стали (ШХ15) и одноименной поверхности в экологически безопасных смазочных материалах.

2. Результаты металлографического и морфологического анализов исследованных традиционных и керамо-полимерных МДО-покрытий.

3. Разработанная технология формирования композиционных антифрикционных керамо-полимерных МДО-покрытий с повышенными триботехническими характеристиками, в сравнении с традиционными МДО-покрытиями.

Степень достоверности результатов исследований в диссертации подтверждается сходимостью полученных расчетных значений с большим объемом экспериментальных данных и обеспечивается корректным проведением экспериментальных исследований, повторяемостью значений, полученных на 3-5 параллельно выполненных испытаниях, применением стандартизированных средств измерений (прошедших государственную поверку) и обработкой данных в соответствии с классическими положениями математической статистики.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. По содержанию и результатам исследований диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.5.3 Трение и износ в машинах в части п. 7 «Триботехнические свойства материалов, покрытий и модифицированных поверхностных слоев» и п. 8 «Триботехнические свойства смазочных материалов».

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты исследований автором получены самостоятельно. В перечисленных в автореферате работах с соавторами личный вклад соискателя заключается в следующем: подготовка и проведение испытаний, анализ полученных данных, оформление и написание работ.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на научных конференциях: 70-й Международной молодежной конференции «Нефть и газ 2016» (Москва, 2016); 71-й Международной молодежной конференции «Нефть и газ 2017» (Москва, 2017); ÖTG-Symposium 2017: «Tribologie in Industrie und Forschung. Neue Aufgaben – Innovative Lösungen» (Винер-Нойштадт, Австрия, 2017); Четвертом междисциплинарном научном форуме с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии» (Москва, 2018); XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН «Трибология – Машиностроению» (Москва, 2018); 7th European Conference on Tribology «ECOTRIB 2019» (Вена, Австрия, 2019), III-й Региональной научно-технической конференции «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России», посвященной 110-летию А.И. Скобло и 105-летию Г.К. Шрейбера (Москва, 2019); Шестом междисциплинарном научном форуме с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии» (Москва, 2020); IV Региональной научно-технической конференции «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России» посвященной 90-летию Губкинского университета и факультета экономики и управления (Москва, 2020); Международной научной конференции «Механика и трибология транспортных систем» (Ростов-на-Дону, 2021); 77-й Международной молодежной конференции «Нефть и газ 2023» (Москва, 2023); Международной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», посвященной 85-летию ИМАШ РАН (Москва, 2023).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 14 печатных работ, в том числе: две статьи в журналах, входящих в перечень и рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, две статьи в ведущих научных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science и/или Scopus, получен патент РФ № 2787330 на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, библиографического списка из 166 наименований. Общий объем работы составляет 150 страниц, включая 48 иллюстраций, 29 таблиц и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научно-исследовательской темы диссертации, поставлены цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость научных результатов, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены особенности эксплуатации и требования, предъявляемые к насосно-компрессорным трубам (НКТ). Показано, что основными причинами выхода из строя стальных насосно-компрессорных труб являются коррозионные разрушения и отказы резьбовых соединений, на долю которых приходится до половины всех отказов НКТ. В качестве решения данных проблем при использовании легкосплавных насосно-компрессорных труб (ЛНКТ) предложено повысить износостойкость резьбы формированием защитного покрытия методом микродугового оксидирования.

Во втором разделе рассмотрены особенности формирования МДО-покрытий, материалы, на которых они формируются и сфера применения изделий с МДО-покрытиями. Показано, что свойства МДО-покрытий зависят от их состава, структуры и обусловлены рядом факторов: материала основы, состава электролита, а также режима обработки. Приведена классификация электролитов для МДО, влияние различных компонентов, вводимых в электролит, на характеристики МДО-покрытий. Отмечено, что одним из перспективных и эффективных направлений в создании новых электролитов, обеспечивающих повышение триботехнических характеристик пар трения, является добавление в электролит дисперсных частиц различной природы с целью внедрения и/или заполнения пор МДО-покрытий, что позволяет наделять покрытия новыми функциональными возможностями. Приведены особенности взаимодействия вводимых частиц в электролит и их влияние на свойства формируемых покрытий. Отмечено, что для алюминия и его сплавов с трибологической точки зрения широкие перспективы представляет создание композиционных керамо-полимерных композиций на основе метода микродугового оксидирования. Приведены различные способы формирования керамо-полимерных покрытий. Отмечено, что ввиду своих антифрикционных свойств введение в электролит частиц фторопласта (политетрафторэтилена) представляется наиболее эффективным. Показано, что несмотря на известные результаты в области одностадийного формирования керамо-полимерных покрытий методом микродугового оксидирования с применением частиц фторопласта, это направление остается перспективным и требует дальнейшего развития.

В третьем разделе приведены сведения об экологических аспектах трибологии. Рассмотрены подходы к решению экологических вызовов. Отмечена польза трибологического анализа в решении экологических проблем. Рассмотрены вопросы об экологических смазочных материалах, их применении и свойствах.

В четвертом разделе изложены цели и задачи исследования.

Вторая глава посвящена выбору исследуемых материалов и режимов для формирования МДО-покрытий, а также методикам проведения испытаний. Представлены методики подготовки образцов для различных видов исследований: триботехнических, металлографических, методика определения пористости, и других видов исследований.

В первом разделе изложены обоснования выбора используемых материалов и краткие сведения о них. МДО-покрытия формировали на образцах из алюминиевых сплавов Д16 и В95 следующих размеров: диски $\text{Ø}24 \times 8$ мм, штифты $\text{Ø}10 \times 6$ мм, кольца $\text{Ø}28 \times 18 \times 6$. Контртелом для испытаний служили образцы из стали ШХ15 (100Cr6) с твердостью 55-60 HRC, а также из тех же алюминиевых сплавов Д16 и В95 при испытаниях по одноименной поверхности. В качестве смазочных материалов были выбраны синтетические базовые масла на основе полиальфаолефинов (ПАО), диизотридецил адипата (ДИТА), полиэтиленгликоля (ПЭГ), перфторированного полиэфира (ПФПЭ) и кремниевого (силиконового) масла (КМ).

Во втором разделе рассмотрена методика формирования МДО-покрытий. Приводится методика предварительной и последующей обработки образцов, составы применяемых электролитов и технологические параметры, использованные для формирования МДО-покрытий. Для проведения исследований триботехнических характеристик при работе в экологических смазочных средах, МДО-покрытия формировали на двух группах образцов: в первой группе образцов формировали «традиционные» МДО-покрытия в анодно-катодном режиме в двух составах слабощелочного электролита.

Вторая группа образцов представляла комбинированные керамо-полимерные МДО-покрытия, сформированные в слабощелочном электролите с добавлением суспензии фторопласта, и была предназначена для исследования влияния добавок полимера на изменение триботехнических свойств пористых МДО-покрытий при работе в экологических смазочных средах. Процесс формирования покрытий образцов второй группы производили преимущественно в анодно-катодном режиме с циклическим чередованием его с анодным.

В третьем разделе изложены методики исследования морфологии и состава МДО-покрытий, которые включали измерение толщины, определение пористости, химического состава, определение содержания полимерного наполнителя.

В четвертом, пятом и шестом разделах представлены методики определения триботехнических характеристик МДО-покрытий при различных схемах трения. Испытания на трение и изнашивание проводились по трем схемам трения: «шар-диск», «штифт-диск», «кольцо-кольцо».

Испытания по схеме трения «шар-диск» проводили в соответствии со стандартом ASTM G133-02 для определения предельных нагрузок МДО-покрытий в исследуемых смазочных материалах. Исследования проводили на высокочастотной установке линейных колебаний (SRV). Образцы для испытаний по этой схеме трения представляли собой диск с размерами $\text{Ø}24 \times 8$ мм

с МДО-покрытием и шарик из стали 100Cr6 (зарубежный аналог стали ШХ15) диаметром 10 мм. На первом этапе испытаний применяли схему нагружения с возрастанием нагрузки от 400 Н до 600 Н. На втором этапе испытания проводили при постоянных нагрузках (400 и 600 Н) в диапазонах стабильных значений коэффициента трения, определенных по результатам испытаний первого этапа. Оценку износа производили с использованием 3D микроскопа.

Испытания по схеме трения «штифт-диск» проводили на установке МТИ-1 разработки РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (в соответствии с ASTM G99-04) при следующих параметрах: нагрузка 200 Н, контактное давление 2,55 МПа, частота вращения диска - 38 об/мин, длительность 60 минут. Образцы представляли собой штифт Ø10 мм и высотой 6 мм с МДО-покрытием и диск из стали 100Cr6 диаметром 110 мм. Подача смазки выполнялась на двух режимах: в условиях аварийного трения (режима масляного голодания), для моделирования ситуации нарушения или полного прекращения подачи смазки и в условиях капельной подачи смазки - 5 капель 1 раз в 30 минут. Оценку износа производили весовым методом.

Испытания по схеме трения «кольцо-кольцо» проводили на машине трения МТ-393 при следующих параметрах: нагрузка на образец – 700 Н, контактное давление – 3 МПа, частота вращения шпинделя 750 об/мин, время единичного цикла испытания 60 минут. В качестве образцов использовались кольца из алюминиевых сплавов Д16 и В95 с МДО-покрытием и кольца из стали ШХ15.

В седьмом разделе приведена методика определения момента свинчивания резьбовой пары. Данный вид испытаний проводили с использованием оборудования для контроля резьбовых смазок по ГОСТ ISO 13678 – 2022. В качестве образцов использовали резьбовые пары из алюминиевого сплава Д16 со сформированным на них керамо-полимерным покрытием. При испытании резьбовой пары скорость завинчивания составляла 1 об/мин, предельный угол поворота 30°.

В восьмом разделе приведена методика обработки экспериментальных данных с определением статистических показателей, характеризующих нормальный закон распределения.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям триботехнических характеристик «традиционных» МДО-покрытий в экологически безопасных смазочных материалах.

В первом разделе изложены результаты морфологического анализа и металлографические исследования МДО-покрытий. Приведены результаты измерения толщины МДО-покрытий и их пористости. Анализ полученных на электронном микроскопе изображений (рисунок 1) показывает разный уровень пористости покрытий, полученных на сплавах Д16 и В95. Покрытие на сплаве В95 более плотное и однородное по химическому составу.

Во втором разделе приведены результаты испытаний по схеме трения «шарик-диск» с возрастающей нагрузкой. Показано, что при испытании в маслах ДИТА и ПЭГ МДО-покрытие, сформированное на сплаве Д16, характеризуется наименьшим объемным износом.

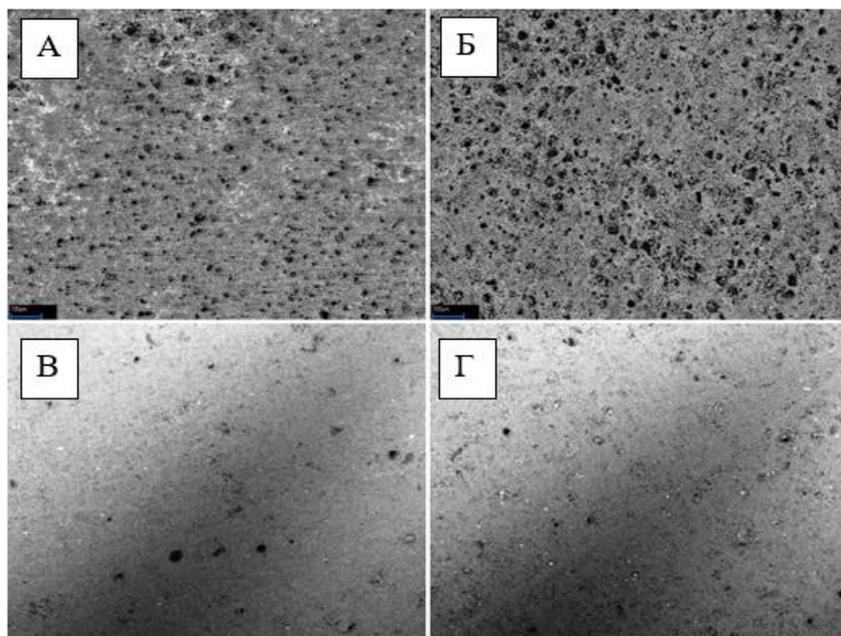


Рисунок 1 – Поверхности МДО-покрытий (увеличение X200) в излучении обратно рассеянных электронов на сплаве: а) Д16 (в электролите №1); б) Д16 (в электролите №2); и) В95 (в электролите №1); г) В95 (в электролите №2)

Для МДО-покрытий на сплаве В95, сформированных в электролите №1, объемный износ характеризуется существенным снижением значений. Причем, в маслах ПЭГ и ДИТА это снижение составило от 4 до 7 раз, а в масле ПАО – более чем в 20 раз (рисунок 2).

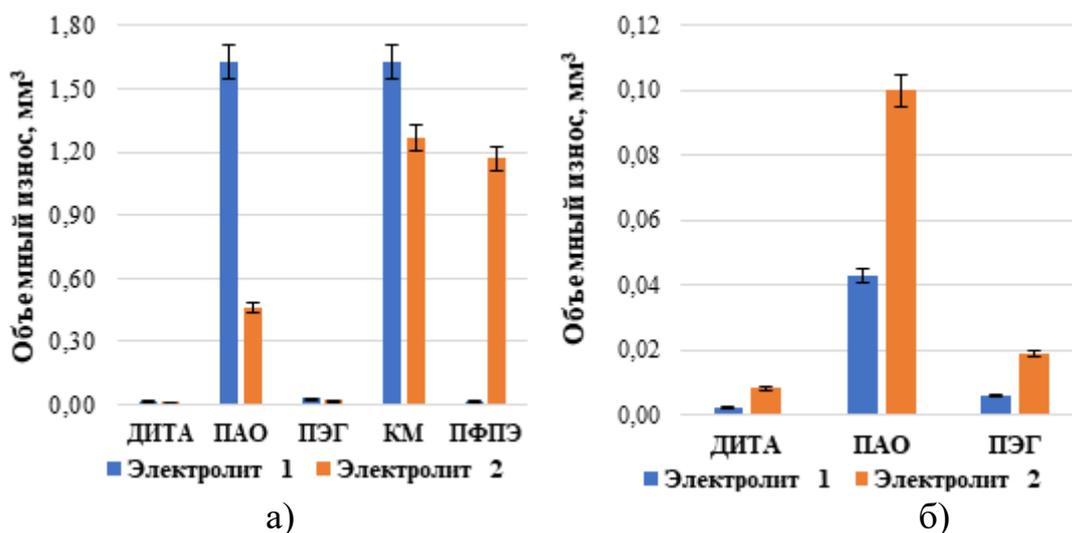


Рисунок 2 – Сопоставление результатов объемного износа после испытания МДО-покрытий с возрастающей нагрузкой.
а) покрытие на сплаве Д16; б) покрытие на сплаве В95.

Результаты испытаний МДО-покрытий в масле ПФПЭ показали, что при приблизительно равных значениях коэффициента трения, величина объемного износа у МДО-покрытий на сплаве Д16, сформированных во втором электролите, существенно выше. Данное явление обусловлено характером

химического взаимодействия МДО-покрытия и смазочного материала. Содержащийся в перфторированном полиэфире фтор, по всей видимости, взаимодействует с элементами, входящими в состав покрытия, снижая, тем самым, механические свойства МДО-покрытия.

Сопоставление износа МДО-покрытий и стальных шариков показало, что в маслах ДИТА и ПЭГ износ стального шарика в 6-8 раз превышает износ МДО-покрытия, сформированного на сплаве Д16. Износ МДО-покрытий на сплаве В95 во всех исследованных маслах ниже износа стального шарика от 8 до 45 раз, что указывает на высокую износостойкость данных покрытий. При этом для сплава Д16 более износостойкое покрытие формируется в электролите №2, а для сплава В95 – в электролите №1.

В третьем разделе приведены результаты испытаний по схеме трения «шарик-диск» с постоянной нагрузкой. Показано, что при нагрузке 400 Н после приработки в течение 600 секунд пары трения демонстрируют стабильный коэффициент трения в диапазоне от 0,14 до 0,21 (рисунок 3). Наиболее низкие значения коэффициента трения показывают МДО-покрытия на сплавах Д16 и В95, сформированные в электролитах №1 и №2, при работе с маслом ДИТА. При этом, МДО-покрытия на сплаве В95 характеризуются лучшими антифрикционными характеристиками, чем покрытия на сплаве Д16.

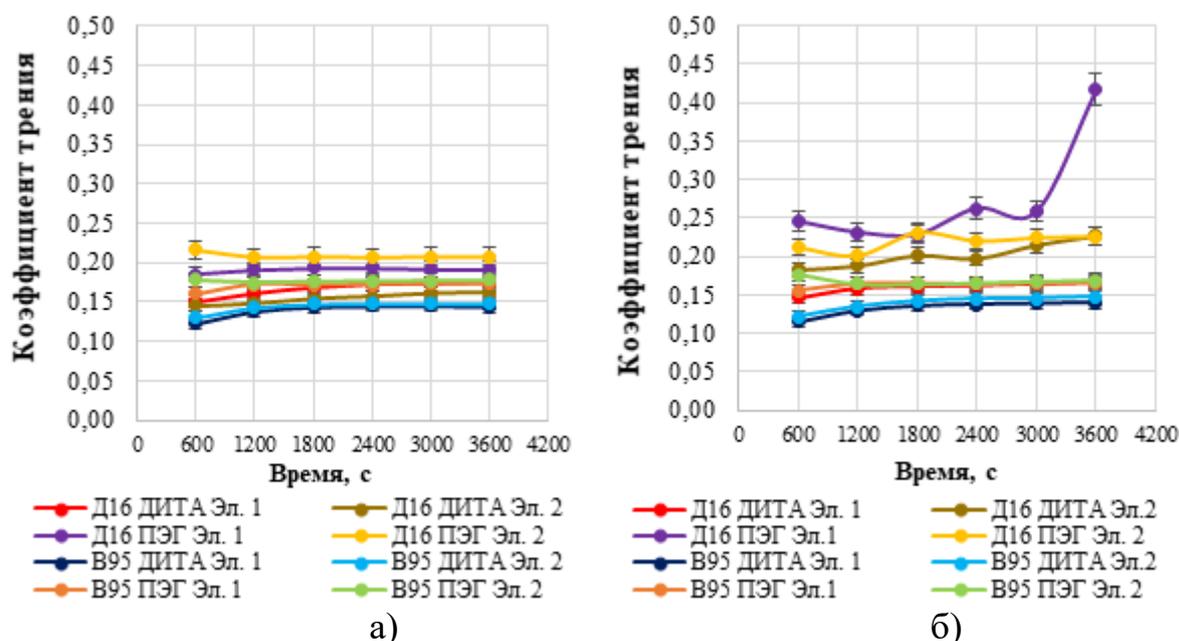


Рисунок 3 – Графики изменения средних значений коэффициента трения при работе МДО-покрытий с экологическими маслами при постоянной нагрузке: а) 400 Н, б) 600 Н.

Значения коэффициентов трения при нагрузке 400 Н у всех исследованных покрытий в масле ПЭГ выше, чем в масле ДИТА. Увеличение коэффициента трения в масле ПЭГ составило 10% для покрытий на сплаве Д16, сформированных в электролите №1, и 30% при формировании покрытий в электролите №2, а для покрытий на сплаве В95 – 23% и 16% соответственно.

Увеличение нагрузки до 600 Н несколько ухудшило стабильность значений коэффициента трения для МДО-покрытий на сплаве Д16. Так, при испытании в масле ПЭГ, пары трения показали относительное увеличение коэффициента трения в течение времени испытаний, за исключением МДО-покрытия, сформированного на сплаве Д16 в электролите №2. Для МДО-покрытий на сплаве В95 при нагрузке 600 Н характерна стабильность значений коэффициентов трения, величина которых сопоставима с уровнем значений для нагрузки 400 Н. Лучшие величины коэффициентов трения в обоих маслах (ДИТА и ПЭГ) демонстрирует покрытие на сплаве В95, сформированное в электролите №2.

В четвертом разделе приведены результаты обработки экспериментальных данных для получения расчетно-экспериментальных зависимостей изменений коэффициента трения и скорости изнашивания МДО-покрытий при трении в экологических смазочных средах. Пример полученных зависимостей представлен на рисунке 4.

Определены уравнения трендов изменения коэффициента трения и линейной скорости изнашивания в зависимости от контактного давления.

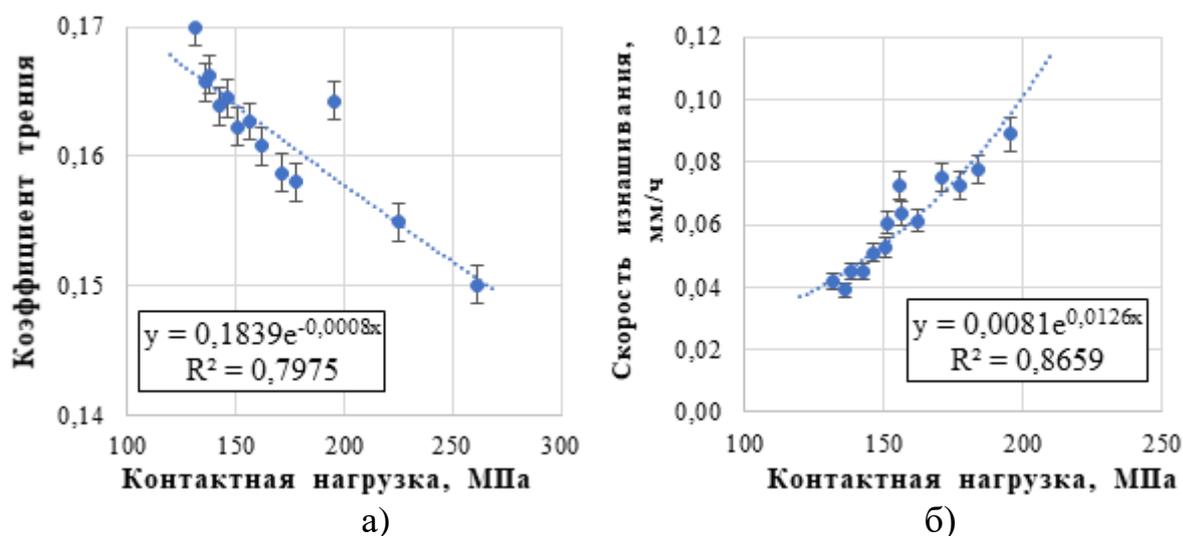


Рисунок 4 – Графики изменения коэффициента трения (а) и скорости линейного изнашивания (б) в зависимости от контактного давления.

Показано, что изменение коэффициентов трения и скоростей изнашивания от приложенного контактного давления для всех исследованных пар трения может быть описано экспоненциальными зависимостями, имеющими тенденции к снижению значений коэффициента трения и увеличению скорости изнашивания при повышении контактного давления (таблица 1).

Минимальное значение коэффициента трения при небольших контактных давлениях показало МДО-покрытие на сплаве В95 при трении в смазке ПЭГ, однако оно демонстрирует наименьшую интенсивность снижения коэффициента трения при повышении давления на контакте. Наиболее значительное снижение коэффициента трения при увеличении контактного давления показало МДО-

покрытие на сплаве Д16, сформированное в электролите №1, при работе в том же масле ПЭГ.

Таблица 1 – Функциональные зависимости коэффициента трения и скорости изнашивания.

Покрытие – смазка	Функциональные зависимости	
	Для коэффициента трения	Для скорости изнашивания, мм/ч
Д16 (эл.1) - ДИТА	$f = 0,1839 \cdot e^{-0,0008 \cdot p}$	$V = 0,0081 \cdot e^{0,0126 \cdot p}$
В95 (эл.1) - ДИТА	$f = 0,2014 \cdot e^{-0,002 \cdot p}$	$V = 0,003 \cdot e^{0,0157 \cdot p}$
В95 (эл.2) – ДИТА	$f = 0,1729 \cdot e^{-0,001 \cdot p}$	$V = 0,0068 \cdot e^{0,0109 \cdot p}$
В95 (эл.1) – ПЭГ	$f = 0,1971 \cdot e^{-0,001 \cdot p}$	$V = 0,0101 \cdot e^{0,0117 \cdot p}$
В95 (эл.2) - ПЭГ	$f = 0,1742 \cdot e^{-0,0004 \cdot p}$	$V = 0,0107 \cdot e^{0,01 \cdot p}$

В пятом разделе приведены результаты испытаний по схеме трения «штифт-диск». Показано, что МДО-покрытие, сформированное на сплаве Д16 в электролите №1, демонстрирует наименьший коэффициент трения в масле ПЭГ. При проведении испытаний в аварийном режиме (масляного голодания) наиболее низкие значения коэффициента трения были получены в масле ПАО при трении МДО-покрытий, сформированных на сплаве В95. Они же показали и наименьший износ (рисунок 5).

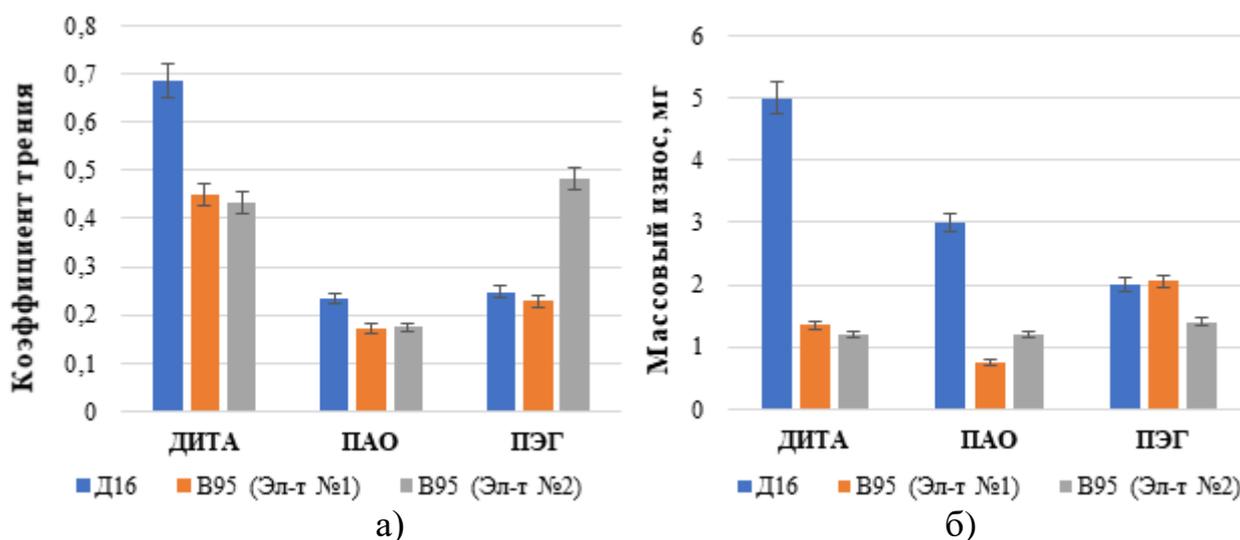


Рисунок 5 – Средние значения коэффициента трения (а) и массового износа (б) при трении в аварийном режиме (масляного голодания).

Четвертая глава посвящена разработке методики формирования и исследованию характеристик новых керамо-полимерных покрытий.

В первом разделе рассмотрено влияние режимов формирования на износостойкость МДО-покрытий. Отмечено, что основой режима формирования

является, прежде всего, анодно-катодный метод при соотношении катодного и анодного токов $I_k/I_a = 1,0 - 1,3$. Выявлено также, что на свойства покрытий оказывают влияние циклическое изменение полярности. Причем, циклическое переключение режимов с анодно-катодного на анодный позволяет выбрать вариант, обеспечивающий получение МДО-покрытий с необходимым комплексом свойств.

Во втором разделе изложена методика разработки технологии формирования композиционного керамо-полимерного покрытия на основе применения полного факторного эксперимента с использованием регрессионного анализа.

В качестве основных регулируемых факторов были выбраны следующие: X_1 – pH электролита; X_2 – количество добавляемых в электролит частиц политетрафторэтилена (мл/л); X_3 – цикличность изменения режимов, выраженная в соотношении длительности в минутах, анодно-катодного (АК) и анодного (А) режимов (таблица 2).

Целевой функцией (параметром оптимизации) была выбрана интенсивность изнашивания I_h .

Таблица 2 - Уровни факторов и интервалы варьирования

Факторы	Уровни факторов (X_i)			Интервалы варьирования ΔX_i
	-1	0	+1	
X_1 – pH электролита;	8,8	9,2	9,6	0,4
X_2 – количество добавляемой в электролит суспензии политетрафторэтилена, мл/л;	10	20	30	10
X_3 – цикличность изменения режимов АК/А, выраженная в соотношении длительности обработки, мин.	3/1	5/1	7/1	2/1

В третьем разделе приведены результаты проведенного полного факторного эксперимента по определению коэффициентов уравнения регрессии и получены значения оптимальных параметров формирования качественных МДО-покрытий с высокой износостойкостью:

$$I_h \cdot 10^7 = 4,1 + 0,67X_1 + 0,8X_3 - 0,97X_1X_2X_3$$

Проведенный на основе полученного уравнения регрессии поиск оптимальных условий позволил определить следующие оптимальные параметры формирования покрытий: pH электролита в диапазоне 9,9-10,1; содержание частиц политетрафторэтилена в растворе – 20 мл/л; циклирование смены режимов АК/А – в диапазоне 5/1 – 11/1.

В четвертом разделе изложены результаты морфологических исследований новых керамо-полимерных покрытий. Приведены результаты измерений толщины формируемых покрытий, которая на алюминиевом сплаве

Д16 составила 90 мкм, а на алюминиевом сплаве В95 – 100 мкм. Показано, что частицы фторопласта распределены по толщине покрытия равномерно, не скапливаясь на поверхности (рисунок 6).

В пятом разделе представлены результаты триботехнических испытаний новых керамо-полимерных покрытий. Испытания, проведенные по схеме трения «кольцо-кольцо», показали, что по сравнению с традиционными МДО-покрытиями, керамо-полимерные покрытия имеют средние значения коэффициента трения ниже на 46,7 % для сплава Д16 при испытании в масле ПЭГ и на 30,7 % для сплава В95 при испытании в масле ДИТА, с абсолютными значениями, лежащими в интервалах 0,036 – 0,151 и 0,01 - 0,127 соответственно.

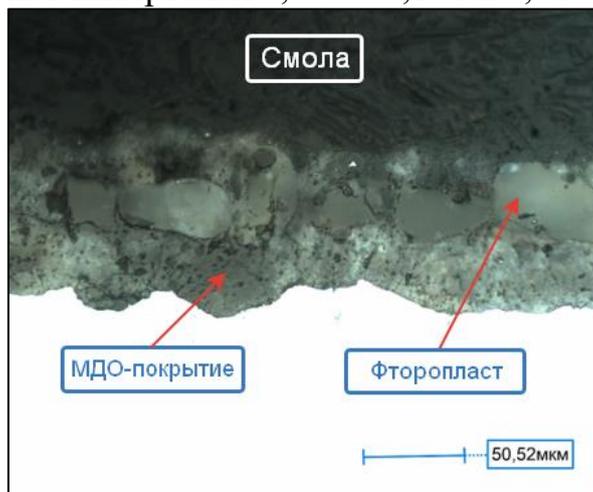


Рисунок 6 – Строение керамо-полимерных покрытий (увеличение x500).

Сопоставление средних значений коэффициентов трения при испытаниях традиционных МДО-покрытий и новых керамо-полимерных покрытий при трении по одноименной поверхности в экологических маслах ПЭГ, ПАО и ДИТА (рисунок 7), показало, что значения коэффициентов трения новых керамо-полимерных покрытий имеют величины на 15,8 – 46,9 % ниже.

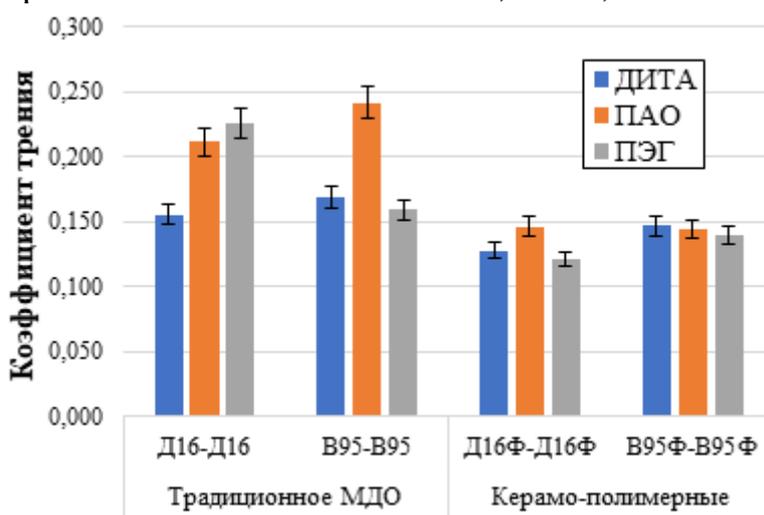


Рисунок 7 – Средние значения коэффициентов трения после испытаний в экологических маслах (МДО-покрытие – МДО-покрытие).

Шестой раздел посвящен практическим рекомендациям применения керамо-полимерных покрытий. Проведена оценка возможности использования экологически безопасных материалов в резьбовых соединениях легкосплавных НКТ (рисунок 8).

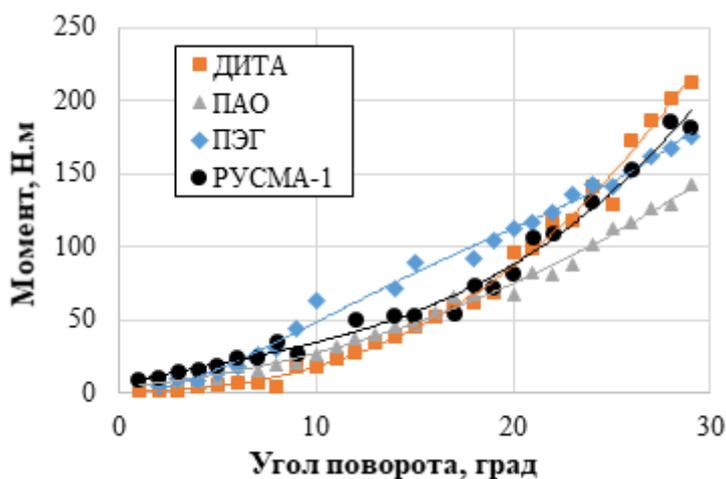


Рисунок 8 – Диаграмма заворачивания образцов с керамо-полимерным покрытием.

Установлено, что при одном и том же угле затяжки резьбовой пары, требуемый для этого момент заворачивания ниже при использовании масла на основе ПАО. При проведении стендовых испытаний на реальных резьбовых соединениях НКТ, экологически безопасные смазочные материалы показали большие углы заворачивания при затягивании, которые находятся в пределах 68-77°, что указывает на их более высокие триботехнические характеристики, по сравнению с традиционно используемой резьбовой смазкой РУСМА-1 (по ТУ 0254-001-46977243-2002).

Результаты проведенных исследований использованы при выполнении научно-исследовательской работы на тему «Минеральные покрытия резьб НКТ» в рамках проекта А220003057 с ПАО «Газпром нефть».

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования показали, что экологически безопасные смазочные материалы могут быть использованы в узлах и парах трения с МДО-покрытиями.

2. МДО-покрытия, сформированные на алюминиевых сплавах при точечном контакте и смазке экологически безопасными смазочными материалами способны выдерживать нагрузку в диапазоне 400 – 600 Н без разрушения поверхности.

3. Получены зависимости изменений коэффициента трения и скорости изнашивания от приложенного контактного давления, которые описываются экспоненциальными зависимостями для всех исследованных пар трения и имеют тенденцию к уменьшению значений коэффициента трения и увеличению значений скорости изнашивания при повышении контактного давления.

4. Материал подложки оказывает существенное влияние на триботехнические характеристики МДО-покрытий: покрытия на высокопрочном сплаве В95 показывают снижение массового износа до 10 раз, по сравнению с покрытиями на сплаве Д16.

5. Разработан новый метод формирования керамо-полимерных покрытий на вентильных металлах и сплавах с включением частиц фторопласта в структуру покрытия. Полученные покрытия обладают хорошими триботехническими характеристиками.

6. Установлено, что наибольшее влияние на интенсивность изнашивания керамо-полимерных МДО-покрытий оказывает эффект суммарного тройного взаимодействия значимых факторов: рН-электролита, количество суспензии ПТФЭ и цикличность смены режимов формирования. При этом, цикличность смены анодно-катодного и анодного режимов оказывает существенное влияние на получение качественных МДО-покрытий и позволяет выбрать вариант, обеспечивающий формирование МДО-покрытий с необходимым комплексом свойств.

7. Керамо-полимерные покрытия в парах трения «МДО-покрытие - сталь ШХ15» показали снижение износа от 31 до 47,5% при относительно равных значениях коэффициента трения (в сравнении с традиционными МДО-покрытиями). При трении по одноименной поверхности (пара трения «МДО-МДО») снижение коэффициента трения составило от 15,8 до 46,9%.

8. Новые керамо-полимерные покрытия и экологически безопасные смазочные масла могут найти применение в резьбовых соединениях труб НКТ, выполненных из алюминиевых сплавов.

Основные публикации по теме диссертационной работы

Публикации в изданиях из перечня ВАК Минобрнауки РФ:

1. Почес, Н. С. Исследование триботехнических характеристик новых керамополимерных покрытий в экологически безопасных смазочных материалах / Н. С. Почес, В. Н. Малышев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 196–203. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_3_196.
2. Малышев, В. Н. Исследование трения и изнашивания МДО-покрытий в условиях смазки базовыми маслами / В. Н. Малышев, Н. С. Почес // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18. – № 5(209). – С. 232–236. – DOI 10.36652/1813-1336-2022-18-5-232-236.

Публикации в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus:

3. Malyshev, V. N. Tribological tests of micro-arc oxidation coatings in environmentally safe lubricants / V. N. Malyshev, N. S. Poches, N. Dörr // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, 16–18 апреля 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 22066. – DOI 10.1088/1757-899X/862/2/022066.

4. Tribological performance of micro-arc oxidation coatings with base oils / V. N. Malyshev, O. Y. Elagina, N. S. Poches [et al.] // Tribologie und Schmierungstechnik. – 2018. – Vol. 65. – No 5. – P. 5-11.

Патент РФ на изобретение:

5. Патент № 2787330 С1 Российская Федерация, МПК С25D 11/02, С25D 15/00. Способ получения композиционных покрытий на вентильных металлах и их сплавах: № 2022127763: заявл. 26.10.2022: опубл. 09.01.2023 / В. Н. Малышев, Н. С. Почес; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина».

Публикации в других изданиях:

6. Триботехнические исследования износостойких МДО-покрытий в экологических смазочных материалах / Н. С. Почес, В. Н. Малышев, А. В. Чавдаров // Труды ГОСНИТИ. – 2018. – Т. 132. – С. 189-195.

Публикации в сборниках материалов конференций и симпозиумов:

7. Почес, Н. С. Исследование триботехнических характеристик МДО-покрытий сформированных в слабощелочных электролитах с добавлением различных компонентов/ Н. С. Почес, В. Н. Малышев // Механика и трибология транспортных систем: сборник статей международной научной конференции, Ростов-на-Дону, 09–10 ноября 2021 года. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2021. – С. 350-355. – DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_350.
8. Малышев, В. Н. Повышение износостойкости узлов трения нефтегазового оборудования методом МДО / В. Н. Малышев, Н. С. Почес // Сборник докладов IV Региональной научно-технической конференции «Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России», посвященной 90-летию Губкинского университета и факультета экономики и управления, Москва, 22–23 октября 2020 года / РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – Москва: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2020. – С. 135.
9. Почес, Н. С. Сравнение триботехнических характеристик традиционных и композиционных МДО-покрытий / Н. С. Почес, В. Н. Малышев // Новые материалы и перспективные технологии: Сборник материалов Шестого междисциплинарного научного форума с международным участием, Москва, 23–27 ноября 2020 года. – Москва: Автономная некоммерческая организация содействия развитию инновационной деятельности "Центр научно-технических решений", 2020. – С. 962-964.
10. Малышев, В. Н. Разработка технологии композиционных МДО-покрытий с полимерными компонентами / В. Н. Малышев, Н. С. Почес, Е. А. Игнатьев // Сборник докладов III Региональной научно-технической конференции "Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России", посвященной 110-летию А.И. Скобло и 105-летию Г.К.

- Шрейбера, Москва, 24–26 сентября 2019 года. – Москва: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина., 2019. – С. 96.
11. Malyshev, V., N. Doerr, O. Elagina and N. Poches, 2019. Tribological performance of micro-arc oxidation coatings in environmentally safe lubricants. ECOTRIB 2019 7th European Conference on Tribology 12-14 June, Wien, Austria, ÖTG, pp: 80
12. Почес, Н. С. Сравнение триботехнических характеристик МДО-покрытий сформированных на сплавах Д16 и В95 при испытании в экологических смазочных материалах / Н. С. Почес, В. Н. Малышев, Н. Дерр // Трибология - машиностроению: Труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН, Ижевск, 19–21 ноября 2018 года. – Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2018. – С. 409-415.
13. Почес, Н. С. Триботехнические исследования износостойких МДО-покрытий в экологических смазочных материалах / Н. С. Почес, В. Н. Малышев, N. Dörr // Четвертый междисциплинарный научный форум с международным участием "новые материалы и перспективные технологии", Москва, 27–30 ноября 2018 года. – Москва: ООО "Буки Веди", 2018. – С. 585-589.
14. Malyshev, V.N., N. Dörr, O.Yu. Elagina, M. Rodriguez-Ripoll and N.S. Poches, 2017. The research of MAO-coatings' tribological behavior in different lubricants. ÖTG-Symposium 2017: "Tribologie in Industrie und Forschung. Neue Aufgaben – Innovative Lösungen", ÖTG pp: 193-201.

Почес Никита Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РЕЗЬБЫ ЛЕГКОСПЛАВНЫХ НАСОСНО-
КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ ФОРМИРОВАНИЕМ МДО-ПОКРЫТИЙ И
ПРИМЕНЕНИЕМ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
Формат 60×84/16

Усл. печ. л. 1,22. Тираж 100 экз. Заказ № _____.

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский
университет) имени И.М. Губкина»
(ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»)

Адрес университета: 119991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1, www.gubkin.ru