

На правах рукописи



Политыко Кирилл Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТРИБОСИСТЕМ ПУТЕМ
МОДИФИЦИРОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ВАКУУМНЫМИ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

Специальность 2.5.3 –Трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону

2026

Работа выполнена на кафедре «Теоретическая механика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Научный руководитель: член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор РАН
Колесников Игорь Владимирович
(ФГБОУ ВО РГУПС НОЦ «Нанотехнологии и новые материалы» НИЧ, ведущий научный сотрудник).

Официальные оппоненты: член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор
Панин Сергей Викторович
(ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина СО РАН лаборатория «Механики полимерных композиционных материалов», заведующий),
кандидат технических наук
Фоминов Евгений Валерьевич
(ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет кафедра «Инженерная и компьютерная графика», доцент).

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Защита состоится **27 ноября 2026** года в **15:30** на заседании диссертационного совета **44.2.005.01**, созданного на базе ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, город Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО РГУПС <https://www.rgups.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года.

Учёный секретарь диссертационного совета 44.2.005.01
д.ф.-м.н., доцент

А. В. Сидашов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современных машинах и механизмах проблема трения и износа остается одной из ключевых, определяющих их надежность и долговечность. Перспективным направлением научного поиска путей повышения эксплуатационного ресурса и безопасности работы машин является развитие технологий, связанных с созданием на поверхности узлов трения модифицированных многокомпонентных функциональных слоев и покрытий (ММФСИП). Существующие и применяемые традиционные методы создания ММФСИП: газопламенные, гальванические, диффузионные и другие – не могут в полной мере обеспечить требования надежности и долговечности, предъявляемые к современным трибоузлам.

В последние годы для повышения трибологических характеристик контактных поверхностей без изменения конфигурации и конструктивной прочности всего трибоузла широко применяются ионно-плазменные покрытия, формирующие на поверхности трибосопряжения модифицирующие слои с заданным химическим составом и комплексом физико-механических и трибологических свойств. Однако при технологическом использовании данных покрытий возникает ряд проблем, связанных с необходимостью изучения влияния нагрузочно-скоростных и температурных факторов на их физико-механические и трибологические свойства.

Особенности синтеза покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), вопросы изучения их структурного состояния и изменения свойств при различных внешних воздействиях нашли отражение в многочисленных работах, опубликованных в научных изданиях за последние 15 лет.

Вместе с тем особенности формирования эквиатомных ионно-плазменных высокоэнтропийных покрытий различного химического состава на деталях узлов трения, так же как и их стабильность в широком диапазоне температур, нагрузок и скоростей, изучены недостаточно.

Таким образом, научная проблема, на решение которой направлены наши исследования, заключается в повышении износостойкости трибосистем путем модифицирования их поверхностного слоя вакуумными высокоэнтропийными покрытиями в условиях возрастающих требований к надежности и ресурсу узлов трения, в том числе для эксплуатации техники в Арктике, космосе и тропических условиях.

Об актуальности и важности таких исследований говорит тот факт, что они были поддержаны грантами Российского научного фонда (проекты РНФ № 21-79-30007, № 21-79-30007-П) и стипендией Президента Российской Федерации для аспирантов и адъюнктов.

Степень разработанности проблемы. В настоящее время, в век интенсивного развития инновационных технологий, усиливается внимание трибологов к повышению надежности, износостойкости и долговечности узлов трения путем применения современных методов нанесения на трибоконтакт тонких износостойких покрытий. Из всего многообразия упрочнения поверхностей трения наибольшее внимание исследователей уделено физическому методу осаждения (Physical vapor deposition, PVD).

Значительный вклад в развитие технологии нанесения износостойких покрытий методом физического осаждения внесли С.В. Панин, С. Н. Григорьев, С. В. Федоров, А. К. Синельщиков, В. П. Жедь, В. И. Колесников, А. И. Григоров, Ю. Г. Кабалдин, А. В. Белый, И. В. Колесников, О. В. Кудряков, В. Н. Варавка, Г. Д. Карпенко, И. П. Третьяков, Л. С. Саблев, И. И. Аксенов, А. А. Андреев, Е.В. Фоминов, В. Г. Падалка, научные коллективы университетских лабораторий в Чехии (J. Musil, S. Veprek, H. Zeman), Великобритании (P. Eh. Novsepien, Q. Luo, W. D. Munz – Sheffield Hallam), Португалии (A. Cavaleiro – Coimbra).

Наиболее известны в настоящее время следующие технологии формирования покрытий: механическое легирование порошков со спеканием мишени и последующим магнетронным напылением покрытий; вакуумно-дуговое осаждение; лазерная импульсная («ударная») обработка; лазерная наплавка; лазерное поверхностное легирование; плазменная наплавка; газотермическое напыление, в том числе высокоскоростное (HVOF) и атмосферное плазменное; горячее прессование порошков; электрохимическое осаждение; электроискровое спекание. При всем многообразии методов получения покрытий оказывается, что набор технологических способов получения высокоэнтروпийных покрытий сравнительно невелик.

В публикациях, посвященных ВЭС в виде покрытий, на сегодняшний день основное внимание уделяется вопросам изучения взаимозависимостей их состава и свойств в основном при комнатной температуре. Значительно меньше работ посвящено изучению механизмов изнашивания в широком диапазоне температур, а также исследованию их трибологических свойств при отрицательных и высоких температурах, что затрудняет применение данных покрытий в машиностроении.

Причин, сдерживающих прогресс научно обоснованного использования покрытий на основе ВЭС, несколько:

- слабая изученность технологических аспектов получения покрытий из ВЭС методом физического осаждения;
- отсутствие данных о механизмах изнашивания покрытий на основе ВЭС различного состава и структуры, а также данных о влиянии температуры окружающей среды на трибологические свойства покрытий на основе ВЭС, в том числе при отрицательных и умеренно повышенных температурах;
- недостаточная проработанность теоретических и экспериментальных закономерностей, принципов прикладного использования покрытий на основе ВЭС триботехнического назначения в реальных узлах трения.

Указанные причины позволяют сформулировать цель и задачи диссертационного исследования.

Целью диссертационного исследования является повышение износостойкости трибосистем, работающих в широком диапазоне изменения нагрузок, скоростей и температур, полученных путем формирования вакуумных высокоэнтропийных покрытий при дуговом осаждении и магнетронном распылении.

Для достижения указанной цели в работе поставлены в следующей последовательности **задачи**:

1. Экспериментальное определение режимов нанесения покрытий CrTiZrNbHf, (CrTiZrNbHf)N при дуговом осаждении и CuCrMnFeCoNi магнетронным распылением.

2. Исследование локального элементного состава и структурно-фазового состояния в высокоэнтропийных покрытиях CrTiZrNbHf, (CrTiZrNbHf)N и CuCrMnFeCoNi с использованием методов сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионного и рентгеноструктурного анализа.

3. Определение физико-механических свойств покрытий CrTiZrNbHf, (CrTiZrNbHf)N и CuCrMnFeCoNi методом наноиндентирования.

4. Оценка трибологических характеристик покрытий CrTiZrNbHf и (CrTiZrNbHf)N, полученных методом трехкатодного дугового осаждения.

5. Исследование трибологических характеристик покрытия CuCrMnFeCoNi, полученного магнетронным распылением, в широком диапазоне нагрузок, скоростей и температуры, разработка математической модели оценки нагрузочно-скоростных режимов покрытия регрессионным анализом.

6. Промышленная апробация высокоэнтропийного покрытия CuCrMnFeCoNi, полученного магнетронным распылением, для повышения эксплуатационной стойкости контактных поверхностей трибосопряжения редукторно-муфтового узла насосной станции продольно-фрезерного станка 6Г610.

Объект исследования. Решения, обозначенные в диссертационной работе в рамках поставленной цели и сформулированных задач, реализуются на примере исследования повышения износостойкости редукторно-муфтового узла насосной станции продольно-фрезерного станка 6Г610 путем применения разработанной технологии модифицирования поверхности трения ионно-плазменными высокоэнтропийными покрытиями.

Предметом исследования является изучение возможностей управления трибологическими параметрами покрытий на основе ВЭС при различных методах их нанесения, установление влияния температурных и нагрузочно-скоростных параметров на износостойкость и коэффициент трения ВЭС-покрытий, взаимосвязь химического состава, структурно-фазового состояния ВЭС-покрытий и их физико-механических и трибологических свойств.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы вакуумного-дугового осаждения и магнетронного распыления покрытий на установке BRV600, а также комплекс современных экспериментальных и расчетных подходов из области материаловедения и трибологии. Микроструктуру и химический состав изучали с помощью сканирующих электронных микроскопов ZEISS EVO MA 18 и ZEISS Crossbeam 340, оснащенных энергодисперсионным рентгеновским детектором (EDAX) модели X-Max 50N, кристаллическую структуру определяли на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 ADVANCE. Физико-механические свойства в нано- и микромасштабе измерялись на платформе Nanotest 600, трибологические испытания проводились на трибометре TRB, машине трения CMT-1 и машине трения, оснащенной термокамерой. Обработку результатов и установление закономерностей влияния

нагрузки и скорости на объемный износ осуществляли с помощью ортогонального плана второго порядка и статистического анализа.

Научная новизна заключается в установлении закономерностей повышения износостойкости трибосистем на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований ВЭС-покрытий, полученных путем физического осаждения, а также в разработке технологических методов для использования таких покрытий в промышленных узлах трения. К наиболее значимым научным результатам относятся следующие:

1. Определены технологические параметры физического осаждения, позволяющие управлять структурно-фазовым состоянием, физико-механическими и трибологическими свойствами высокоэнтропийных покрытий CrTiZrNbHf, (CrTiZrNbHf)N и CuCrMnFeCoNi.

2. Показано, что регулирование парциального давления азота в вакуумной камере в пределах $P_N = 0,15\text{--}0,19$ Па при нанесении покрытия CrTiZrNbHf формирует наноструктурированное нитридное ВЭС-покрытие с высокими физико-механическими и трибологическими характеристиками.

3. Установлены закономерности влияния температуры на трибологические свойства высокоэнтропийного покрытия CuCrMnFeCoNi в диапазоне от -60 до $+150$ °C.

4. На основе установленных закономерностей влияния нагрузочно-скоростных параметров на износостойкость покрытия CuCrMnFeCoNi построена математическая модель, позволяющая определять область режимов работы узла трения и прогнозировать его эксплуатационные свойства.

Теоретическая значимость работы:

1. На основании статистической обработки экспериментальных исследований получена система регрессионных уравнений в виде полиномов 3-й степени изменения физико-механических свойств (H , E , H/E , H^3/E^2) ВЭС-покрытий в функциональной зависимости от опорного напряжения и концентрации азота в вакуумной камере, позволяющих определять область их оптимальных значений.

2. Для количественной оценки влияния нагрузочно-скоростных условий на интенсивность изнашивания покрытия CuCrMnFeCoNi и определения диапазона его устойчивой работы была построена регрессионная модель, позволяющая производить количественное описание интенсивности изнашивания в виде математической модели.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны и экспериментально обоснованы технологические режимы нанесения покрытия на основе высокоэнтропийного сплава CuCrMnFeCoNi методом магнетронного распыления, обеспечивающие формирование слоя равномерной и заданной толщины на посадочных поверхностях деталей узлов трения с высокой износостойкостью.

2. Обоснованный выбор сплава CuCrMnFeCoNi и разработанные режимы физического осаждения обеспечивают формирование в покрытии однофазной гранецентрированной кубической структуры (ГЦК-структуры) твердого раствора, высокую скорость нанесения в сочетании с повышенной износостойко-

стью и низким коэффициентом трения для широкого диапазона температур, что позволяет применять разработанное покрытие при эксплуатации машин и механизмов в различных климатических условиях.

3. Предложена и реализована конструктивно-технологическая схема и технология нанесения покрытия CuCrMnFeCoNi на контактную поверхность приводного вала редукторно-муфтового узла насосной станции продольно-фрезерного станка 6Г610 в условиях производства Ростовского электровозоремонтного завода (РЭРЗ) – филиала АО «Желдорремаш», позволившая повысить ресурс узла в 3,93 раза по сравнению с базовым состоянием.

Достоверность и обоснованность научных результатов диссертационной работы основаны на использовании комплекса современных методов физико-материаловедческого анализа и строгих подходов математической статистики. Сходимость полученных структурно-фазовых, механических и трибологических характеристик с данными независимых исследований, а также высокая согласованность аналитических выводов с результатами лабораторных и стендовых испытаний подтверждают надежность и воспроизводимость сформулированных научных положений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Режимы формирования высокоэнтропийных покрытия трибологического назначения методом физического осаждения.

2. Особенности структурно-фазового состояния и физико-механические свойства покрытий CrTiZrNbHf , $(\text{CrTiZrNbHf})\text{N}$ и CuCrMnFeCoNi , полученных вакуумно-дуговым испарением и магнетронным распылением.

3. Экспериментальная оценка трибологических свойств покрытий CrTiZrNbHf , $(\text{CrTiZrNbHf})\text{N}$ и CuCrMnFeCoNi при изменении нагрузки, скорости скольжения и температуры.

4. Регрессионная модель взаимосвязи нагрузки, скорости и интенсивности изнашивания, позволяющая определять рациональную область нагрузочно-скоростных режимов эксплуатации и прогнозировать ресурс покрытия.

5. Результаты заводских испытаний, подтверждающие, что применение покрытия CuCrMnFeCoNi в сопряжении «вал – муфта» редукторно-муфтового узла насосной станции станка 6Г610 обеспечивает увеличение ресурса узла по сравнению с базовой конструкцией без покрытия при отсутствии отказов в реальных условиях эксплуатации.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на ряде международных и всероссийских конференций, в том числе Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (Ростов-на-Дону, 2024, 2025 гг.), Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» (Ростов-на-Дону, 2024, 2025 гг.), XXXXI Международной научно-технической интернет-конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» (Брянск, 2025 г.), International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (Kitakyushu, Japan, 2025), XII Международном симпозиуме «Безопасность космических полетов» (Санкт-Петербург, 2025 г.), а также в ходе

работы Школы молодых ученых «Актуальные проблемы трибологии, инженерии поверхности и искусственного интеллекта» (Ростов-на-Дону, 2023–2025 гг.).

Публикации. Основные положения и результаты исследований опубликованы в 24 печатных работах (общий объем 12,86 п. л., лично автору принадлежат 6,46 п. л.), из них 8 – в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, и 6 в международных базах цитирования Web of Science и Scopus, а также в 1 патенте.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 203 источника, и пяти приложений. Работа изложена на 144 страницах, включает 30 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность повышения износостойкости трибосистем за счет модифицирования их поверхностного слоя вакуумными ВЭС-покрытиями в условиях возрастающих требований к ресурсу и надежности узлов трения, включая эксплуатацию в экстремальных температурных диапазонах. Показано, что при наличии значительного числа работ, посвященных высокоэнтропийным сплавам и PVD-покрытиям, недостаточно исследованы особенности формирования эквиатомных ВЭС-покрытий на реальных деталях, влияние режимов вакуумно-дугового осаждения и магнетронного распыления на структурно-фазовое состояние и физико-механические свойства указанных покрытий, а также их трибологическое поведение в широком диапазоне нагрузок, скоростей и температур. Дана оценка степени разработанности проблемы по отечественным и зарубежным источникам, выявлены нерешенные задачи, связанные с отсутствием данных о трибологических характеристиках ВЭС-покрытий при отрицательных и умеренно повышенных температурах и их применении в узлах трения машиностроения. Во введении определены объект исследования, предмет исследования, сформулированы цель работы, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, достоверность и обоснованность научных результатов, а также содержатся сведения об апробации полученных результатов, структуре и объеме диссертации.

В первой главе представлен аналитический обзор современных покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов и методов их получения для повышения износостойкости трибосопряжений. Рассмотрены критерии формирования высокоэнтропийных сплавов (энтропия смешения ΔS_{mix} , энтальпия смешения ΔH_{mix} , разница атомных размеров δ , электроотрицательная разница $\Delta\chi$, концентрация валентных электронов VEC), приведена классификация ВЭС по составу и структуре, а также проанализированы их физико-механические и трибологические свойства. Особое внимание уделено PVD-технологиям нанесения трибологических покрытий на основе ВЭС (вакуумно-дуговое осаждение и магнетронное распыление), их возможностям и ограничениям при формировании покрытий на реальных деталях узлов трения. На основании термодинамического анализа и данных литературы обоснован выбор систем CrTiZrNbHf и

CuCrMnFeCoNi для формирования износостойких ионно-плазменных покрытий, обеспечивающих требуемое сочетание структуры, твердости и стабильности при эксплуатации в широком диапазоне температур.

Вторая глава диссертации полностью посвящена методическому обеспечению проведения исследований. В качестве основного материала образцов-подложек для нанесения ВЭС-покрытий была выбрана сталь 40ХН2МА, часто используемая в машиностроении для изготовления нагруженных узлов трения. В экспериментах использовались образцы с сорбитной структурой со следующими физико-механическими характеристиками: $H = 2,5$ ГПа; $E = 200$ ГПа; $H/E = 0,0125$; $H^3/E^2 = 0,00039$ ГПа.

Нанесение покрытий системы Cr-Ti-Zr-Nb-Hf осуществлялось тремя катодами из материалов: Zr/Nb/Hf – № 1; Cr – № 2; Ti – № 3. Для обеспечения требуемой толщины покрытия в процессе осаждения варьировались содержание аргона от 7–8 до 15 %, опорное напряжение на подложке в диапазоне 0–150 В. Для увеличения скорости нанесения в камеру дополнительно производился напуск азота %N = 0–15 %. Нанесение покрытий системы Cu-Cr-Mn-Fe-Co-Ni выполнялось методом магнетронного распыления эквивалентной мишени Fe₁₈Co₁₈Cr₁₆Mn₁₇Ni₁₈Cu₁₃.

Основной объем исследования состава и структуры покрытий выполнялся с использованием методик растровой электронной микроскопии (РЭМ), рентгеноструктурного анализа (РСА). Для определения физико-механических свойств использовался метод непрерывного индентирования на измерительной платформе NanoTest 600. Трибологические испытания покрытий проводились на трибометре TRB по схеме «шар – пластина», где контртелом выступал шар из оксида алюминия (Al₂O₃), а в качестве пластины выступал стальной образец с нанесенным покрытием. Испытания проводились при нагрузках 1, 5, 10 Н. Профиль лунки износа определяли при помощи оптического профилометра Zygo NewView 600. Интенсивность изнашивания определялась по формуле:

$$J = \frac{V}{P \cdot L}, \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м}), \text{ где } V - \text{объем изношенного материала, мм}^3; P - \text{нормальная нагрузка, Н; } L - \text{пройденный индентором путь, м.}$$

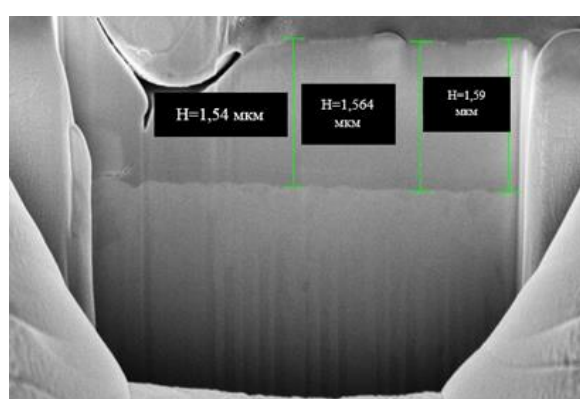
Определение нагрузочно-скоростных режимов покрытия CuCrMnFeCoNi проводилось на машине трения СМТ-1 по схеме «ролик – колодка», где контртелом выступал ролик Ø40 мм из стали Ст45. Испытания проводились при нагрузках 50, 125, 200 Н и скоростях скольжения 0,1, 0,2, 0,3 м/с. Интенсивность изнашивания определялась по формуле: $I = \frac{V}{L} \text{ мм}^3/\text{м}$, где V – объем изношенного материала, мм³; L – путь скольжения, м.

Трибологические характеристики в широком диапазоне температур определялись на специально разработанном трибометре при температуре в зоне контакта -60 ± 5 и 150 ± 5 °С при нагрузке 10 Н.

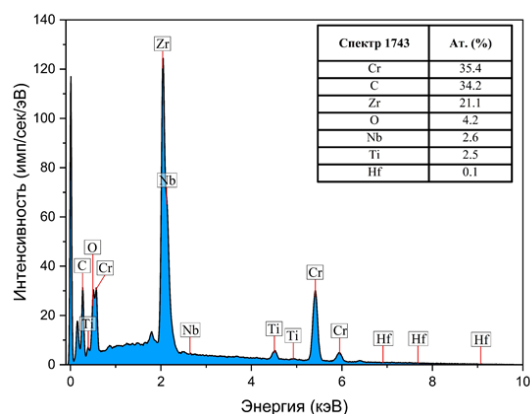
Результаты выполненных исследований физико-механических и трибологических характеристик покрытий подвергались статистической обработке данных, далее они анализировались с помощью методик регрессионного анализа.

Третья глава посвящена результатам исследования состава, структуры и физико-механических свойств вакуумных высокоэнтروпийных покрытий CrTiZrNbHf, (CrTiZrNbHf)N, полученных трехкатодным дуговым осаждением и CuCrMnFeCoNi, полученное магнетронным распылением. Установлено влияние технологических параметров физического осаждения – опорного напряжения на подложке U_s и подачи азота на формирование структурно-фазового состояния и комплекс характеристик покрытий.

При трехкатодном дуговом осаждении покрытий CrTiZrNbHf увеличение подачи аргона до 15 % и варьирование опорного напряжения в диапазоне $U_s = 0\text{--}150$ В обеспечили формирование покрытий толщиной 0,5–1,5 мкм за 2–8 ч (рисунок 1, а). Покрытия характеризовались однородной структурой и плотным прилеганием к подложке из стали 40XH2МА.



а



б

Рисунок 1 – Структура покрытий CrTiZrNbHf и результаты энергодисперсионного анализа их элементного состава:

а – кросс-секция покрытия с маркерами толщины; б – элементный состав (ат.%)

Методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа установлено, что трехкатодное дуговое осаждение не обеспечивает формирования стабильного эквиатомного состава CrTiZrNbHf. Рассчитанная энтропия смешения $\Delta S_{\text{mix}} = 7,38$ Дж/(К·моль) не соответствует критериальному диапазону высокоэнтропийных систем, что указывает на ограниченные возможности трехкатодной дуговой технологии для получения эквиатомных покрытий указанной системы. Дополнительные расчеты критериев ВЭС продемонстрировали, что $\Delta H_{\text{mix}} \approx -10,5$ кДж/моль, $\delta \approx 10,6$ %, $\Delta \chi \approx 0,154$, $VEC \approx 5,2$. Совокупность этих значений указывает на ограниченную энтропийную стабилизацию твердого раствора и предрасположенность системы CrTiZrNbHf к образованию преимущественно ОЦК-твердого раствора.

Введение азота в вакуумную камеру при дуговом осаждении покрытия (CrTiZrNbHf)N способствовало более полному переносу компонентов многокатодной системы в формируемый слой.

По данным энергодисперсионного анализа (рисунок 2, б), введение азота при осаждении покрытия (CrTiZrNbHf)N повышает содержание Ti, Zr и Nb, а также обеспечивает присутствие Hf в составе покрытия, однако не приводит к формированию строго эквиатомной системы. Введение азота увеличивает кон-

фигурационную энтропию смешения до $\Delta S_{\text{mix}} = 12,37$ Дж/(К·моль). Расчетные параметры $\Delta H_{\text{mix}} \approx -3,05$ кДж/(К·моль), $\delta \approx 21,1$ %, $VEC \approx 4,46$ указывают на формирование сильно искаженного многокомпонентного твердого раствора с высокой вероятностью образования нитридных фаз.

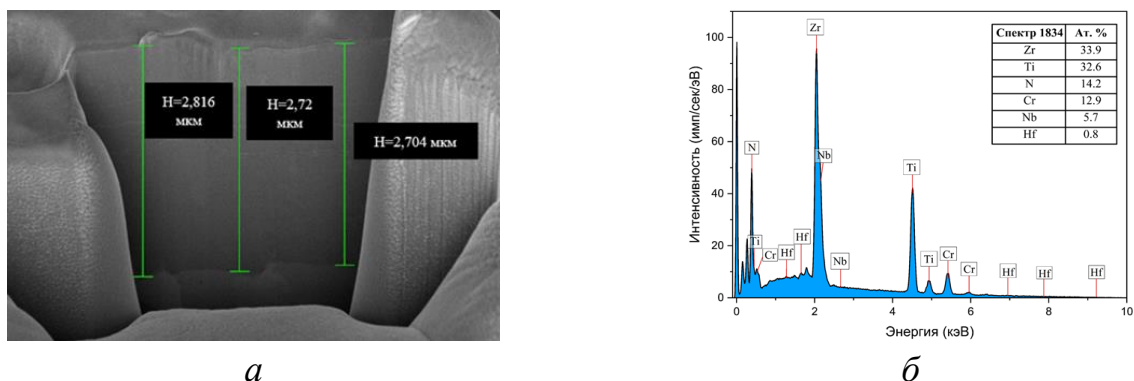


Рисунок 2 – Структура покрытия (CrTiZrNbHf)N:

a – кросс-секция покрытия; *б* – элементный состав покрытия (ат. %).

Рентгеноструктурный анализ покрытия CrTiZrNbHf выявил уширенные диффузные рефлексы при $2\Theta = 33,7^\circ$, $36,7^\circ$ и $41,85^\circ$ (рисунок 3, *a*), характеризующие структурное состояние покрытия. Их сильное уширение и неразрешенная дублетность свидетельствуют о формировании многокомпонентного твердого раствора, характеризуемого существенно искаженной кристаллической решеткой, преимущественно ОЦК-типа, с высоким уровнем внутренних напряжений, нанокристаллическим строением и возможной частичной аморфизацией.

Рентгеноструктурный анализ покрытия (CrTiZrNbHf)N (рисунок 3, *б*) выявил формирование сложного многофазного состояния. Наряду с многокомпонентным твердым раствором идентифицированы нитридные фазы $\text{TiN}_{0,26}$ и $(\text{Cr}_{0,5}\text{Ti}_{0,5})\text{N}$. Азот приводит к перераспределению Cr и Ti в нитридные соединения и образованию многофазной структуры с высокими внутренними напряжениями.

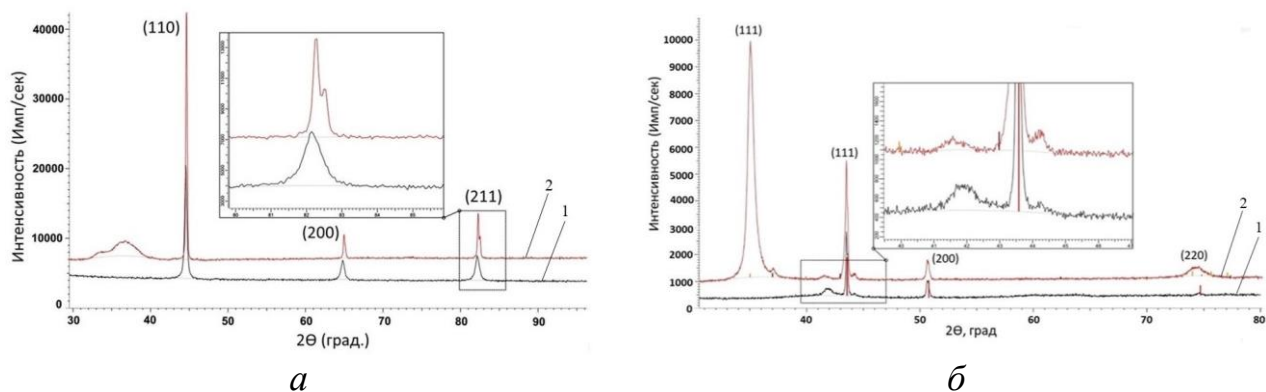


Рисунок 3 – Дифрактограммы покрытий:

a – CrTiZrNbHf (1 – покрытие CrTiZrNbHf; 2 – подложка 40XH2MA);

б – (CrTiZrNbHf)N: (1 – покрытие CrTiZrNbHf; 2 – покрытие (CrTiZrNbHf)N)

Для получения покрытий с более контролируемым составом был применен магнетронный метод распыления эквиатомной мишени системы CuCrMnFeCoNi. Установлено, что покрытия имеют толщину 11–19 мкм (рисунок 4, а, б) при скорости осаждения 0,045–0,053 мкм/мин, что на порядок превышает скорость формирования покрытий CrTiZrNbHf при дуговом осаждении.

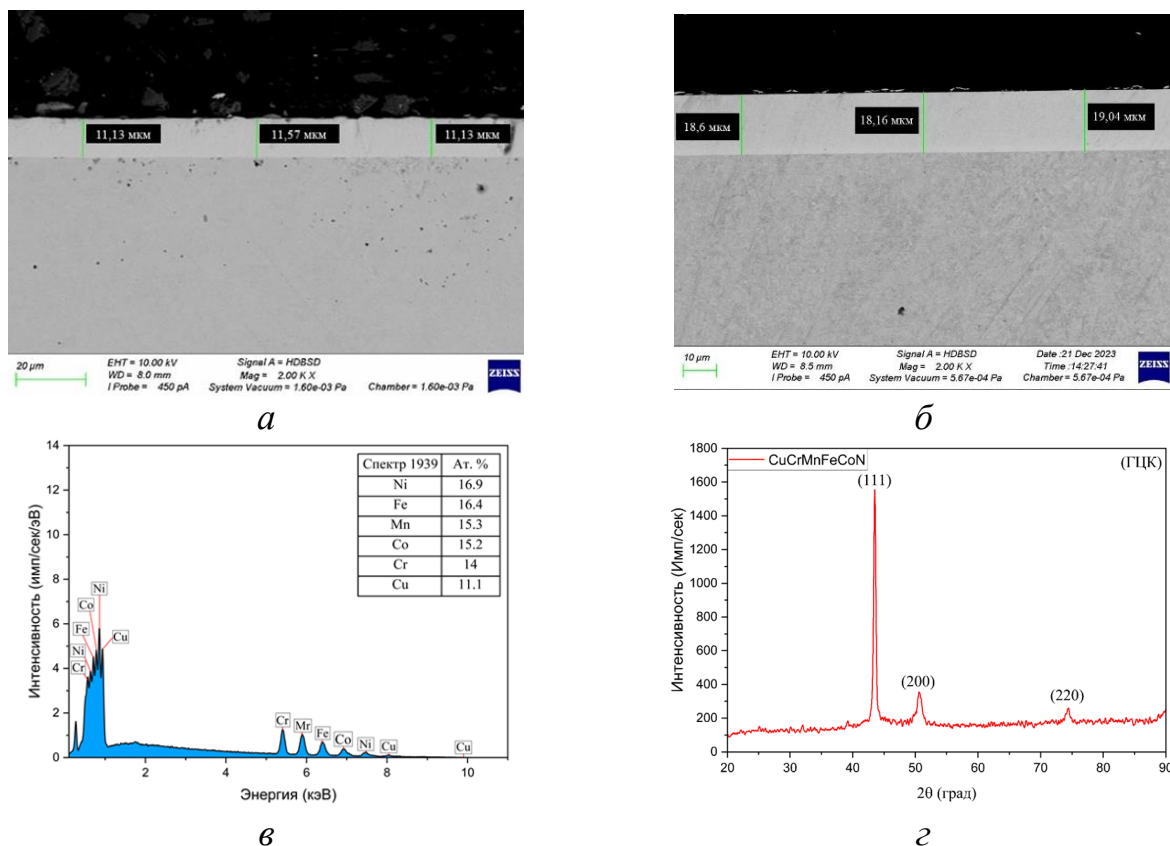


Рисунок 4 – Структура покрытий CuCrMnFeCoNi:

а, б – в поперечном сечении; в – элементный состав покрытия;
г – дифрактограмма, полученная с поверхности покрытия

Элементный состав покрытия CuCrMnFeCoNi близок к эквиатомному (рисунок 4, в). Значение энтропии смешения $\Delta S_{\text{mix}} = 13,83$ Дж/(К·моль) соответствует критерию высокоэнтропийного состояния. Дополнительные расчеты критериев ВЭС продемонстрировали, что $\Delta H_{\text{mix}} \approx +0,16$ кДж/(К·моль), $\delta \approx 1,14$ %, $\Delta \chi \approx 0,136$, $VEC \approx 8,44$. Совокупность этих значений создает предпосылки к образованию в покрытии CuCrMnFeCoNi однофазного твердого раствора с ГЦК-решеткой, характерного для кантор-подобных ВЭС.

Рентгеноструктурным анализом (рисунок 4, г) покрытия CuCrMnFeCoNi установлено формирование однофазного твердого раствора с ГЦК-решеткой. Рефлексы при $2\theta = 43,48^\circ$, $50,65^\circ$ и $74,29^\circ$ подтверждают ГЦК-структуру, а их смещение и изменение интенсивности относительно чистой меди и γ -Fe указывают на искажение кристаллической решетки вследствие растворения компонентов высокоэнтропийной системы. Однофазная ГЦК-структура определяет повышенную способность покрытия к пластической деформации при контактном нагружении.

Увеличение опорного напряжения при осаждении покрытий CrTiZrNbHf от 0 до 150 В приводит к росту твердости и индексов сопротивления упругой и пластической деформации. Оптимальный диапазон значений напряжения составляет $U_s = 105\text{--}115$ В (рисунок 5), при котором достигаются значения: $H \geq 7,5$ ГПа; $E \geq 130$ ГПа; $H/E \geq 0,057$; $H^3/E^2 \geq 0,028$ ГПа. По сравнению с покрытием, осажденным $U_s = 0$ В, твердость возрастает примерно в 2 раза, H/E – в 5 раз, а H^3/E^2 – более чем в 50 раз.

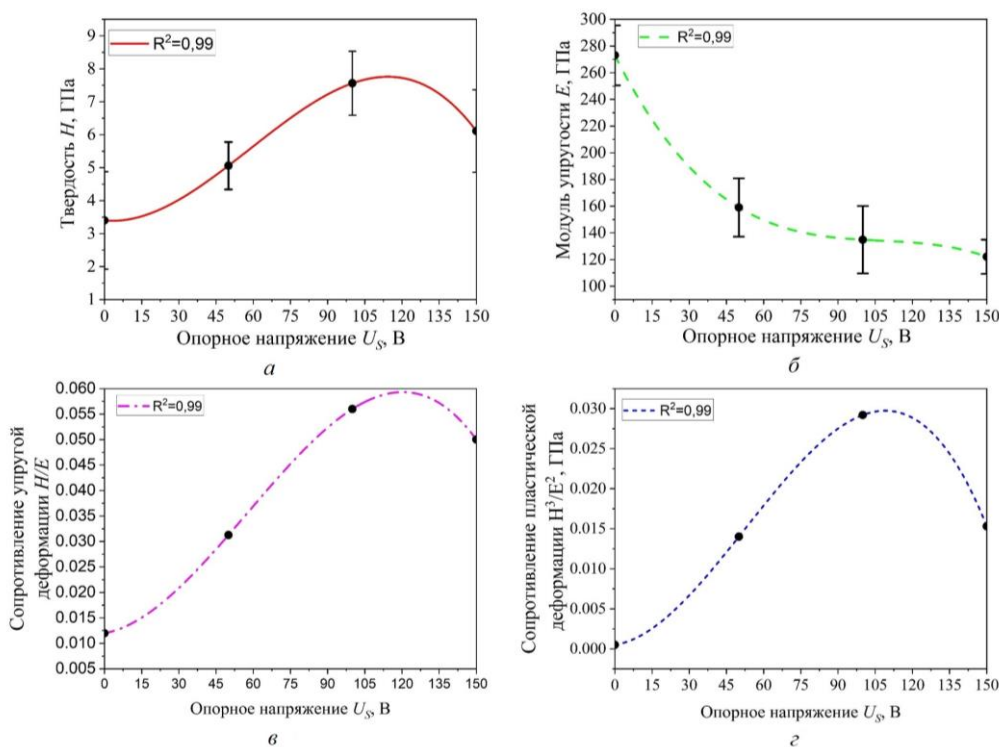


Рисунок 5 – Зависимости физико-механических свойств покрытия системы CrTiZrNbHf от напряжения смещения U_s :

$$a - H = f(U_s); \text{ б} - E = f(U_s); \text{ в} - H/E = f(U_s); \text{ г} - H^3/E^2 = f(U_s)$$

Введение азота обеспечивает дополнительное повышение физико-механических свойств покрытий (CrTiZrNbHf)N (рисунок 6). При увеличении содержания азота от 0 до 15 % твердость возрастает от 7,5 до 21,63 ГПа, модуль упругости – от 130 до 272 ГПа, индекс H/E – от 0,057 до 0,079, а индекс H^3/E^2 – от 0,028 до 0,136 ГПа. Оптимальная область подачи азота составляет %N = 13–15, при которой обеспечиваются значения $H \geq 20\text{--}21$ ГПа; $E \geq 272$ ГПа; $H/E \geq 0,07$; $H^3/E^2 \geq 0,1$ ГПа. Упрочнение связано с формированием нитридных фаз и прочных химических связей с участием Ti, Zr, Nb и Hf.

Трехкатодное дуговое осаждение позволяет формировать покрытия CrTiZrNbHf и (CrTiZrNbHf)N с регулируемыми физико-механическими свойствами, однако отклонение состава от эквиатомного и многофазность структуры ограничивают воспроизводимость их характеристик. Покрытие CuCrMnFeCoNi характеризуется твердостью $H = 8,28$ ГПа, модулем упругости $E = 144,1$ ГПа, индексом сопротивления упругой деформации $H/E = 0,059$ и индексом сопротивления пластической деформации $H^3/E^2 = 0,034$ ГПа. По сравне-

нию со сталью 40ХН2МА значения H/E , H^3/E^2 выше более чем в 3, 4,7 и 87 раз соответственно.

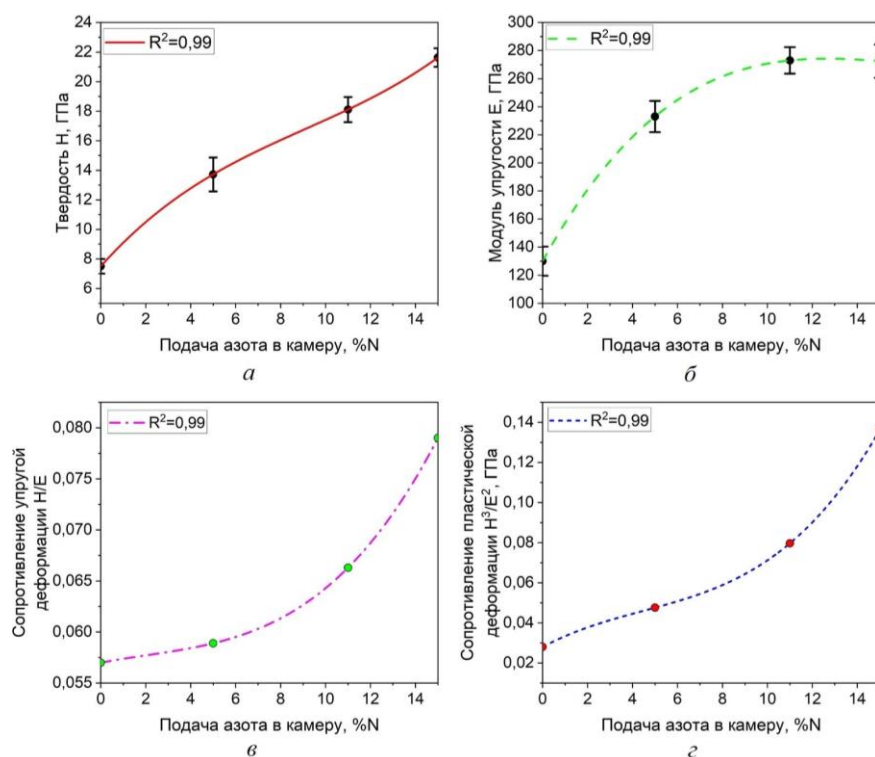


Рисунок 6 – Зависимости физико-механических свойств нитридного покрытия (CrTiZrNbHf)N от параметра %N:

$$a - H = f(\%N); \text{ б } - E = f(\%N); \text{ в } - H/E = f(\%N); \text{ з } - H^3/E^2 = f(\%N)$$

Сочетание однофазной ГЦК-структуры, повышенной деформационной способности и значительной толщины определило выбор покрытия CuCrMnFeCoNi для последующих трибологических исследований в широком диапазоне нагрузок, скоростей и температур.

В четвертой главе исследованы трибологические свойства покрытий CrTiZrNbHf, (CrTiZrNbHf)N и CuCrMnFeCoNi. Установлены закономерности влияния параметров осаждения, нагрузки, скорости скольжения и температуры на коэффициент трения, интенсивность изнашивания и механизмы разрушения покрытий. Основное внимание уделено покрытию CuCrMnFeCoNi, полученному магнетронным распылением и обладающему близким к эквивалентному химическим составом, однофазной ГЦК-структурой, достаточной толщиной и повышенными показателями сопротивления упругой и пластической деформации.

Трибологические испытания покрытий CrTiZrNbHf и (CrTiZrNbHf)N проводили по схеме «шар – пластина» при нагрузке 5 Н и скорости скольжения 1 мм/с. Выбор нагрузки обусловлен разрушением покрытия CrTiZrNbHf при предварительных испытаниях более 5 Н. Выбор нагрузки 5 Н обеспечил сохранение работоспособности обоих покрытий и корректность их сравнительной оценки. Результаты трибологических испытаний покрытий CrTiZrNbHf и (CrTiZrNbHf)N приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Трибологические свойства покрытий CrTiZrNbHf и (CrTiZrNbHf)N

Тип покрытия	Трибологические свойства		
	Параметр U_s , В	Коэффициент трения μ	Интенсивность изнашивания J , $10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$
Покрытие системы CrTiZrNbHf	0	0,8	91,68
	50	0,59	35,35
	100	0,55	20,1
	150	0,61	25,41
Нитридное покрытие системы (CrTiZrNbHf)N ($U_s \approx 100 \text{ В}$)	%N		
	0	0,55	20,1
	5	0,29	8,49
	11	0,26	5,34
	15	0,12	4,16

Для покрытия, сформированного без подачи опорного напряжения, коэффициент трения составлял $\mu \approx 0,8$, а интенсивность изнашивания достигала $91,68 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$. Повышение опорного напряжения до $U_s = 100 \text{ В}$ обеспечило снижение коэффициента трения до $\mu \approx 0,55$ и интенсивности изнашивания до $20,1 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$. Данный режим соответствует максимальным значениям индексов H/E и H^3/E^2 , что подтверждает взаимосвязь физико-механических и трибологических свойств покрытия.

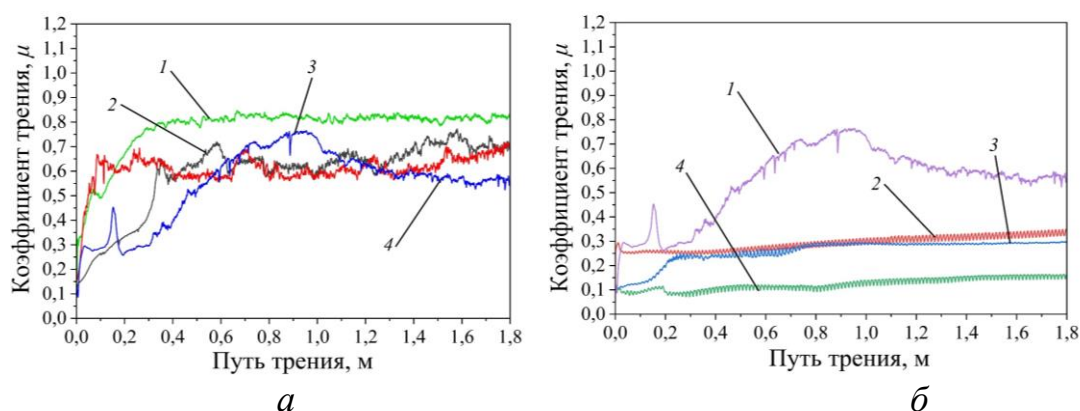


Рисунок 7 – График зависимости коэффициента трения от пути трения:
 а – CrTiZrNbHf: 1 – $U_s = 0 \text{ В}$; 2 – $U_s = 50 \text{ В}$; 3 – $U_s = 100 \text{ В}$; 4 – $U_s = 150 \text{ В}$;
 б – (CrTiZrNbHf)N: 1 – N = 0 %; 2 – N = 5 %; 3 – N = 11 %; 4 – N = 15 %

Введение азота при $U_s = 100 \text{ В}$ приводит к существенному улучшению трибологических характеристик покрытия (CrTiZrNbHf)N. При увеличении содержания азота от 0 до 15 % коэффициент трения снижается с $\mu \approx 0,55$ до $\mu \approx 0,12$ (рисунок 7, б), а интенсивность изнашивания с $19,5 \cdot 10^{-6}$ до $4,16 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ (таблица 1). Следовательно, азотирование обеспечивает снижение интенсивности изнашивания приблизительно в 4,5 раза. Полученный эффект обу-

словлен формированием в покрытии нитридных фаз $\text{TiN}_{0,26}$ и $(\text{Cr}_{0,5}\text{Ti}_{0,5})\text{N}$, повышением твердости и сопротивления пластической деформации.

С учетом близкого к эквиаtomному состава, однофазной ГЦК-структуры, увеличенной толщины и комплекса физико-механических свойств покрытие CuCrMnFeCoNi выбрано в качестве основного объекта комплексных трибологических исследований. Результаты зависимости коэффициента трения от пути трения, представлены на рисунке 8.

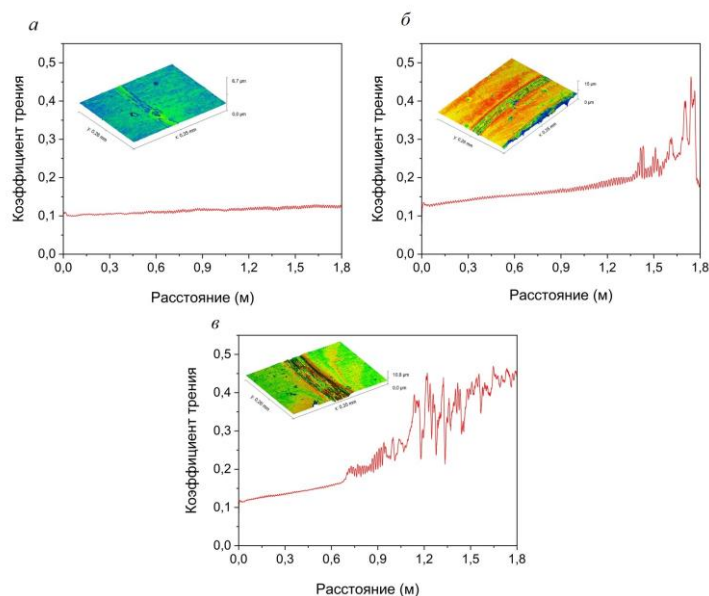


Рисунок 8 – График зависимости коэффициента трения от пройденного пути и профиль поверхности образцов после трибологических испытаний:

a – 1 Н; *б* – 5 Н; *в* – 10 Н

При нагрузке 1 Н покрытие характеризуется устойчивым коэффициентом трения $\mu = 0,10\text{--}0,12$ и низкой интенсивностью изнашивания $J = 7,03 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$.

После испытаний на поверхности формируется неглубокая дорожка трения без признаков отслоения покрытия (рисунок 9, *a*). Такой режим соответствует преимущественно усталостному изнашиванию с формированием защитного трибослоя. Присутствие меди в поверхностной зоне способствует снижению сдвиговых напряжений в контакте.

При повышении нагрузки до 5 Н коэффициент трения изменяется в диапазоне $\mu = 0,12\text{--}0,45$, а интенсивность изнашивания возрастает до $21,51 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ (таблица 2). В дорожке трения появляются несплошности и локальные трещины, что свидетельствует о развитии пластической деформации и частичном разрушении защитного поверхностного слоя (рисунок 9, *б*). При нагрузке 10 Н интенсивность изнашивания увеличивается до $72,8 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$, наблюдаются коалесценция микротрещин, отслоение фрагментов покрытия и абразивное воздействие продуктов износа (рисунок 9, *в*). Установлена смена доминирующего механизма изнашивания: от усталостного при малых нагрузках к абразивно-деформационному с элементами усталостного разрушения при повышении нагрузки.

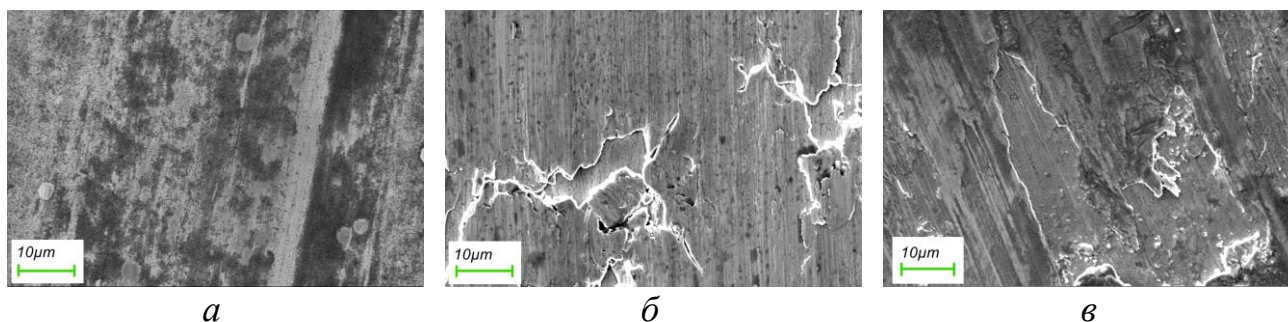


Рисунок 9 – Поверхность дорожки трения:

- а* – образование следа взаимодействия «индентор – покрытие» (1 Н);
б – образование несплошностей в зоне дорожки трения (5 Н);
в – отслаивание фрагментов покрытия (10 Н)

Таблица 2 – Результаты трибологических испытаний покрытия CuCrMnFeCoNi

Объект исследования	Нагрузка, Н	Коэффициент трения	$S_{\text{ср}}, \text{мм}^2$	$L, \text{м}$	$J, 10^{-6} \text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$
CuCrMnFeCoNi	1	0,1–0,12	$9,16 \cdot 10^{-7}$	1,8	7,03
	5	0,12–0,45	$1,4 \cdot 10^{-5}$		21,51
	10	0,12–0,45	$9,48 \cdot 10^{-5}$		72,8

Температурные испытания покрытия CuCrMnFeCoNi проведены при -60 ± 5 и $+150 \pm 5$ °С, нагрузке 10 Н, скорости скольжения 1 мм/с. Результаты зависимости коэффициента трения от пути трения, представлены на рисунке 10.

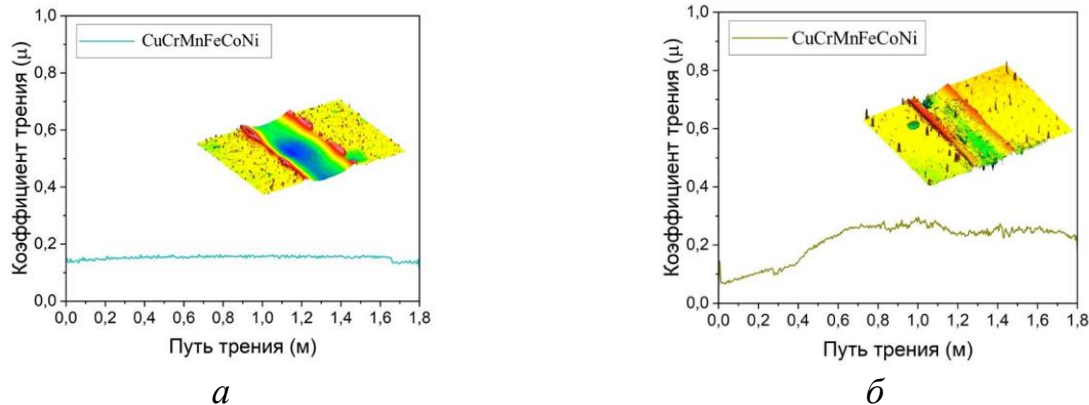


Рисунок 10 – Изменение коэффициента трения покрытий CuCrMnFeCoNi:
а – при температуре -60 °С; *б* – при температуре $+150$ °С

При температуре -60 ° С покрытие сохраняет стабильный коэффициент трения $\mu = 0,16$ при интенсивности изнашивания $J = 4,20 \cdot 10^{-6} \text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$. Поверхность после испытаний характеризуется сглаженной центральной зоной дорожки трения и незначительным пластическим выдавливанием материала по ее краям. Формирование морфологии поверхности данного характера обусловлено комплексом физико-химических процессов на трибоконтакте. При этом нагрузка трения распределяется более равномерно, предотвращаются процессы микросхватывания и улучшаются антифрикционные свойства.

При $+150$ °С коэффициент трения увеличивается до $\mu = 0,26$, а интенсивность износа возрастает до $61,09 \cdot 10^{-6} \text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$, то есть приблизительно в 14,5

раза по сравнению с испытанием при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. На поверхности дорожки трения фиксируются борозды, пластическая деформация, микротрещины и локальное выкрашивание материала. Совокупность выявленных морфологических признаков свидетельствует о преимущественно абразивно-усталостном характере изнашивания покрытия при повышенной температуре.

Для количественной оценки влияния нагрузки и скорости скольжения на интенсивность изнашивания покрытия CuCrMnFeCoNi реализован ортогональный план второго порядка. В результате статистической обработки экспериментальных данных получено адекватное уравнение регрессии в виде полинома второго порядка, описывающее зависимость интенсивности износа от нагрузки и скорости скольжения. Проверка воспроизводимости опытов по критерию Кохрена подтвердила однородность дисперсий: $G_p < G_{\text{табл}}$ ($0,4582 < 0,4775$). Адекватность уравнения регрессии подтверждена по критерию Фишера – при уровне значимости 0,95 уравнение адекватное.

После расчета коэффициентов уравнения ($b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$) и учета статистических значимых коэффициентов было получено уравнение регрессии в кодовых значениях:

$$Y = 337,84 + 237,57 \cdot X_1 + 50,18 \cdot X_2 + 47,12 \cdot X_1 \cdot X_2 + 213,34 \cdot X_1^2 - 222,33 \cdot X_2^2.$$

Установлено, что определяющее влияние на интенсивность износа оказывает нагрузка: линейный коэффициент при факторе нагрузки $b_1 = 237,57$ более чем в 4 раза превышает коэффициент влияния скорости скольжения $b_2 = 50,18$. Положительный коэффициент взаимодействия факторов $b_{12} = 47,12$ свидетельствует об усилении изнашивания при одновременном увеличении нагрузки и скорости скольжения. Положительный квадратичный коэффициент при нагрузке $b_{11} = 213,34$ указывает на ускоренный рост интенсивности изнашивания при увеличении контактной нагрузки, тогда как влияние скорости имеет нелинейный характер.

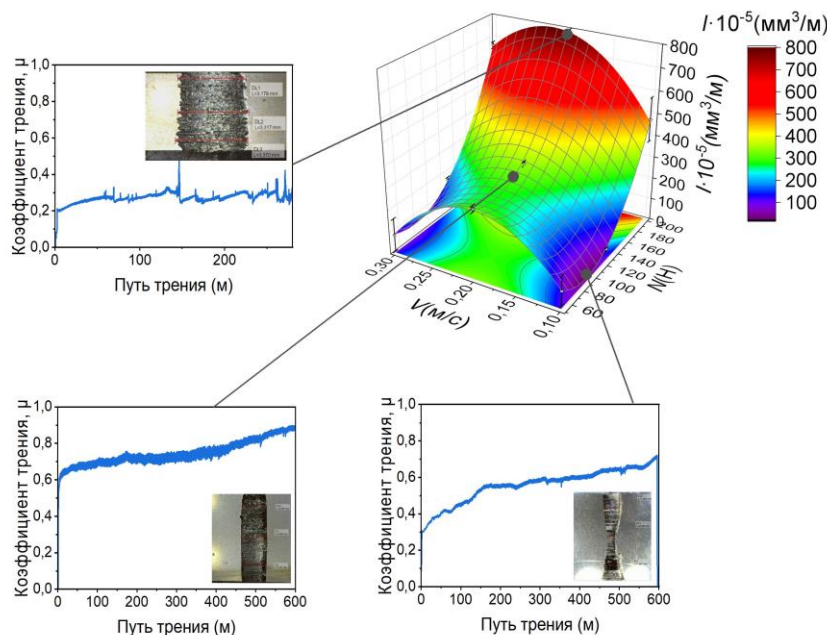


Рисунок 11 – Изменение интенсивности изнашивания покрытия CuCrMnFeCoNi от нагрузки и скорости, с дорожками трения и зависимостью коэффициента трения от пути

Для выполнения геометрической интерпретации математической модели получено уравнение в натуральных значениях факторов:

$$I = -298,1 - 7,57 \cdot N + 8609,53 \cdot V + 6,28 \cdot N \cdot V + 0,0379 \cdot N^2 - 22232,78 \cdot V^2.$$

Геометрическая интерпретация модели (рисунок 11) позволяет определить закономерности его трибологического поведения. При нагрузке 50 Н глубина дорожки трения составляет около 2 мкм, то есть деформация локализуется преимущественно в покрытии. При нагрузке 125 Н глубина дорожки возрастает до 36 мкм, превышая толщину покрытия, что свидетельствует о вовлечении в процесс изнашивания подложки. При нагрузке 200 Н наблюдается катастрофическое разрушение покрытия: глубина дорожки достигает 68 мкм, а образец не проходит заданный путь трения 500 м. Таким образом, разработанная модель позволяет определять область допустимых нагрузочно-скоростных режимов эксплуатации покрытия CuCrMnFeCoNi: устойчивый режим трения, при котором износ локализуется в пределах покрытия без выхода на стальную подложку, реализуется при нагрузке 50 Н и скоростях скольжения 0,1–0,3 м/с. Повышение нагрузки до 125 Н является предельным режимом, превышение которого сопровождается разрушением покрытия.

В пятой главе разработаны практические рекомендации по повышению износостойкости редукторно-муфтового узла привода насосной станции продольно-фрезерного станка 6Г610 путем нанесения высокоэнтропийного покрытия CuCrMnFeCoNi на контактную поверхность приводного вала. Заводские испытания на Ростовском электровозоремонтном заводе показали, что применение покрытия увеличивает ресурс узла с 1100 до 4320 ч, то есть в 3,93 раза, при снижении интенсивности изнашивания с 0,115 до 0,0063 мм³/ч. Результаты подтверждают возможность промышленного применения покрытия CuCrMnFeCoNi для повышения ресурса узлов трения металлообрабатывающего оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

По результатам выполненных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что высокоэнтропийные покрытия CrTiZrNbHf/(CrTiZrNbHf)N и CuCrMnFeCoNi могут быть использованы в качестве покрытий антифрикционного назначения для применения в нагруженных узлах трения при определенных температурных интервалах, нагрузках и скоростях трения. Вывод основан на выполненном комплексе исследований, представленных в работе, начиная с отработки технологических режимов нанесения покрытий и заканчивая установлением закономерностей формирования износа покрытий при трибоиспытаниях. По каждому из этапов комплекса выполненных работ сформулированы следующие основные выводы:

1. Разработан и реализован комплекс вакуумных технологий, включающий вакуумно-дуговое осаждение с использованием трехкатодной системы и магнетронное распыление с мишени заданного состава, обеспечивающий получение однородных по толщине, без выраженных дефектов, с плотным прилеганием к подложке покрытий CrTiZrNbHf/(CrTiZrNbHf)N и CuCrMnFeCoNi.

2. Показано, что трехкатодное дуговое осаждение не обеспечивает формирования эквиатного покрытия CrTiZrNbHf , за счет существенного дефицита Ti, Nb и Hf, что ограничивает воспроизводимость его структурно-фазового состояния и свойств.
3. Введение азота в рабочую камеру в пределах 13–15% повышает скорость нанесения покрытия CrTiZrNbHf , способствует перераспределению элементов с увеличением их содержания. Формирование нитридных фаз $\text{TiN}_{0,26}$ и $(\text{Cr}_{0,5}\text{Ti}_{0,5})\text{N}$ приводит к повышению твердости до 20–21 ГПа и индексов упругости H/E и пластичности H^3/E^2 , а также к снижению коэффициента трения до $\mu = 0,12\text{--}0,3$ и уменьшению интенсивности изнашивания в 4,5 раза по сравнению с покрытием CrTiZrNbHf без азота. Вместе с тем, введение азота в покрытие CrTiZrNbHf переводит его в класс многофазных нитридных покрытий, поскольку критерии энтропийных сплавов при этом не удовлетворяются.
4. Применение магнетронного распыления увеличивает скорость осаждения покрытия CuCrMnFeCoNi с толщиной 11–19 мкм и близким к эквиатному составу с ГЦК-структурой твердого раствора, обладающего твердостью $H = 8,28$ ГПа, модулем упругости $E = 144,1$ ГПа, отношениями $H/E = 0,059$ и $H^3/E^2 = 0,034$ ГПа.
5. Установлена зависимость трибологических свойств покрытия CuCrMnFeCoNi от нагрузки. При нагрузках до 5 Н реализуется преимущественно усталостный механизм изнашивания с коэффициентом трения $\mu = 0,10\text{--}0,12$ и минимальной интенсивностью изнашивания $J = 7,03 \cdot 10^{-6}$ мм³/(Н·м). При повышении нагрузки в интервале от 5 до 10 Н происходит переход к абразивно-деформационному механизму с элементами усталостного разрушения и значительным ростом износа.
6. Трибологические свойства покрытия CuCrMnFeCoNi зависят от температурного диапазона эксплуатации. При температуре -60°C : коэффициент трения покрытия составляет $\mu = 0,16$, а интенсивность изнашивания $J = 4,20 \cdot 10^{-6}$ мм³/(Н·м). При повышении температуры до $+150^\circ\text{C}$ коэффициент трения возрастает до $\mu = 0,26$, что приводит к увеличению интенсивности изнашивания.
7. На основе ортогонального плана второго порядка разработана регрессионная модель, описывающая влияние нагрузки и скорости скольжения на интенсивность изнашивания покрытия CuCrMnFeCoNi . При диапазоне нагрузок от 50 до 125 Н скорости скольжения от 0,1 до 0,3 м/с наблюдается минимальная интенсивность изнашивания покрытия в процессе трения, с повышением нагрузки более 125 Н наблюдается разрушения покрытия.
8. Практическая значимость результатов исследования подтверждена модернизацией редукторно-муфтового узла насосной станции продольно-фрезерного станка 6Г610 на Ростовском-на-Дону электровозоремонтном заводе (РЭРЗ) – филиале АО «Желдорремаш». Заводские испытания позволили установить, что использование покрытия CuCrMnFeCoNi в трибосистеме «вал – муфта» обеспечило снижение площади износа вала в

4,7 раза, увеличив ресурс работы узла в 3,93 раза. Акт с результатами заводских испытаний представлен в приложении к диссертации.

Перспективы дальнейших исследований по теме диссертации

1. Представляет интерес исследование поведения покрытий CuCrMnFeCoNi в более широком диапазоне температур (выше 150 °С и ниже –60 °С), а также в условиях смазанного и граничного трения, что позволит уточнить границы работоспособности системы и механизмы термоокислительной деградации.

2. Перспективным направлением является варьирование содержания Cu в системе CrMnFeCoNi, легирование дополнительными элементами (Al, V и др.), а также формирование многослойных и градиентных структур (например, металл/нитрид на основе CrTiZrNbHf), что позволит целенаправленно управлять физико-механическими и трибологическими характеристиками покрытий.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ

1. Инновационный метод напыления покрытий Cu–Cr–Mn–Fe–Co–Ni высокой износостойкости / **К. Н. Политыко**, И. В. Колесников, О. А. Беляк, [и др.] // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2026. – Т. 27, № 7. – С. 311–319. – DOI 10.36652/0202-3350-2026-27-7-311-319.
2. Повышение ресурса редукторно-муфтового узла станка 6Г610 путем нанесения покрытия на основе высокоэнтропийного сплава CuCrMnFeCoNi / **К. Н. Политыко**, В. И. Колесников, И. В. Колесников [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2026. – № 2. – С. 148–158. – DOI 10.52261/02346206_2026_2_148.
3. Трибологические характеристики высокоэнтропийных покрытий CrTiZrNbHf и CuCrMnFeCoNi в широком диапазоне температур / **К. Н. Политыко**, И. В. Колесников, О. А. Беляк [и др.] // Frontier Materials & Technologies. – 2026. – № 2. – С. 65–78. – DOI 10.18323/2782-4039-2026-2-76-6.
4. **Политыко, К. Н.** Анализ технологий нанесения высокоэнтропийных покрытий методом физического осаждения / К. Н. Политыко, И. В. Колесников, Д. С. Мантуров // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2024. – Т. 24, № 4. – С. 369–391. – DOI 10.23947/2687-1653-2024-24-4-369-391.
5. Методы повышения физико-механических и трибологических характеристик тяжело нагруженных металлических и металлополимерных трибосистем / В. И. Колесников, П. Д. Мотренко, О. А. Беляк, И. В. Колесников, **К. Н. Политыко**, А. И. Воропаев // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2024. – № 11 (161). – С. 24–31. – DOI 10.30987/2223-4608-2024-24-31.
6. Нанесение износостойких PVD-покрытий на фрикционные поверхности шестерен и муфт шестерен перспективной автоматической коробки передач / И. В. Колесников, В. В. Шаповалов, О. И. Коваленко, **К. Н. Политыко**, И. А. Колодяжный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4 (96). – С. 49–59. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_49.

7. Модернизация фрикционного низкоамплитудного демпфера с вакуумным ионно-плазменным покрытием рабочих поверхностей трения / В. И. Колесников, С. Л. Чернышев, И. В. Колесников, П. А. Коропец, В. Д. Вермель, А. Н. Корякин, **К. Н. Политыко** // *Авиационные материалы и технологии*. – 2024. – № 3 (76). – С. 106–118. – DOI 10.18577/2713-0193-2024-0-3-106-118.
8. Механический фрикционный демпфер авиационных конструкций на основе вращательных пар трения / В. И. Колесников, К. И. Сыпало, А. Л. Медведский, М. Ч. Зинченко, А. Н. Корякин, **К. Н. Политыко** // *Вестник Московского авиационного института*. – 2024. – Т. 31, № 3. – С. 72–82.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science

9. **Polityko, K. N.** Structural-Phase Features and Tribological Properties of Ion-Plasma Coatings CrTiZrNbHf and CuCrMnFeCoNi / K. N. Polityko // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2026. – Т. 55, № 5. – С. 524–534. – DOI 10.1134/S1052618826700585.
10. High-entropy coating resources for use in space technology / V. I. Kolesnikov, O. V. Kudryakov, O. A. Belyak, D. S. Manturov, I. V. Kolesnikov, **K. N. Polityko** // *Acta Astronautica*. – 2026. – Vol. 238. Part A. – P. 1447–1456. – DOI 10.1016/j.actaastro.2025.09.095.
11. Influence of Technological Parameters on the Properties of Coatings Based on HEA Cr–Ti–Zr–Nb–Hf and (Cr–Ti–Zr–Nb–Hf)N: From Structure to Wear Resistance / **K. N. Polityko**, V. I. Kolesnikov, I. V. Kolesnikov, O. A. Belyak, D. S. Manturov, A. I. Azoyan, E. D. Anikina // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2026. – Vol. 55, No. 3. – P. 241–254. – DOI 10.1134/S1052618826700020.
12. Self-Organizing Processes in the Structure of CrTiZrNbHf (HEA) Ion-Plasma Coatings Obtained Using a Multicathode Arc Spraying Technology / V. I. Kolesnikov, O. V. Kudryakov, V. N. Varavka, I. V. Kolesnikov, **K. N. Polityko** // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2024. – Vol. 53, No. 6. – P. 544–554. – DOI 10.1134/S105261882470122X.
13. Tribological and Thermodynamic Properties of the High Entropy Alloys CrMnFeCoNi and CuCrMnFeCoNi, Their Stability, and Structure Prediction / V. I. Kolesnikov, A. A. Guda, I. V. Kolesnikov, S. A. Guda, **K. N. Polityko**, Yu. A. Abzaev // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2024. – Vol. 53, No. 5. – P. 432–442. – DOI 10.1134/S1052618824700985.
14. Structural Features of CrTiZrNbHf Ion-Plasma High-Entropy Coatings Produced by Multi-Cathode Arc Sputtering / V. I. Kolesnikov, O. V. Kudryakov, A. I. Bogdanov, V. N. Varavka, **K. N. Polityko** // *Physics of Metals and Metallography*. – 2025. – Vol. 126, No. 4. – P. 375–386. – DOI 10.1134/S0031918X24601562.

Патенты:

15. Патент № 2856522 С1 Российская Федерация, МПК С23С 14/16, С23С 14/24, С23С 14/35. Способ получения износостойкого антифрикционного покрытия из высокоэнтروпийного сплава / А. И. Воропаев, И. В. Колесников, В. И. Колесников, П. Д. Мотренко, Е. С. Новиков, **К. Н. Политыко**, А. П. Сычев ; заявитель Ростовский вертолетный производственный комплекс Акционерное общество «Роствертол» имени Б.Н. Слюсаря. – № RU2025119082А ; заявл. 10.07.2025 : опубл. 24.02.2026.

16. **Polityko, K. N.** Investigation of physico-mechanical and tribological properties of a coating based on a high-entropy alloy CuCrMnFeCoNi / K. N. Polityko // International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA 2025): Abstracts & Schedule, Kitakyushu, Japan, September 27-30, 2025). – 2025. – P. 235–236.
17. Technological Resources for the Formation of a Given Level of Properties of Vacuum Ion-plasma Coatings from High-entropy Alloys / O. V. Kudryakov, V. I. Kolesnikov, V. N. Varavka, **K. N. Polityko** // International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA 2025): Abstracts & Schedule, Kitakyushu, Japan, September 27-30, 2025). – 2025. – P. 173–174.
18. **Политыко, К. Н.** Исследование физико-механических и трибологических свойств покрытий CrTiZrNbHf и (CrTiZrNbHf)N / К. Н. Политыко // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 23–25 апреля 2025 года / ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения». – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2025. – С. 308–312.
19. **Политыко, К. Н.** Оценка нагрузочно-скоростных характеристик покрытия CuCrMnFeCoNi при трении / К. Н. Политыко // Школа молодых ученых «Актуальные проблемы трибологии, инженерии поверхности и искусственного интеллекта 2024» : сборник трудов конференции, Ростов-на-Дону, 12–13 ноября 2024 года. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2025. – С. 66–71.
20. **Политыко, К. Н.** Исследование трибологических свойств покрытия на основе высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi, легированного медью / К. Н. Политыко, Д. С. Мантуров, А. И. Азоян // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2025. – № 41. – С. 36–41.
21. **Политыко, К. Н.** Исследование влияния технологических параметров на структуру высокоэнтропийного покрытия / К. Н. Политыко // Транспорт: наука, образование, производство : материалы Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 24–26 апреля 2024 года / ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения». – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2024. – С. 181–184.
22. **Политыко, К. Н.** Повышение износостойкости на трибоконтакте за счет нанесения износостойких вакуумных покрытий / К. Н. Политыко // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России («ТрансПромЭк-2024») : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов-на-Дону, 24–26 октября 2024 года. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2024. – С. 30–34.
23. Колесников, И. В. Исследование ионно-плазменных покрытий / И. В. Колесников, **К. Н. Политыко** // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4 (69). – С. 76–84.
24. **Политыко, К. Н.** Формирование PVD-покрытий для трибологического назначения / К. Н. Политыко, Д. С. Мантуров // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3 (64). – С. 81–93.

Личный вклад соискателя. Положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. В работах с соавторами личный вклад соискателя заключается в следующем: [1–8, 10–16, 17, 20, 23, 24] – разработка режимов нанесения вакуумных высокоэнтропийных покрытий CrTiZrNbHf, (CrTiZrNbHf)N и CuCrMnFeCoNi; [4] – анализ, систематизация и обобщение литературных данных о технологиях физического осаждения высокоэнтропийных покрытий, сравнительная оценка вакуумно-дугового осаждения и магнетронного распыления для формирования износостойких покрытий триботехнического назначения; [5–8, 12, 23] – исследование физико-механических и трибологических характеристик высокоэнтропийных покрытий, обработка и обобщение результатов; [3, 20] – исследование влияния нагрузки, скорости скольжения и температуры на коэффициент трения и интенсивность изнашивания покрытия CuCrMnFeCoNi, построение и анализ регрессионной модели нагрузочно-скоростных режимов; [10, 11, 13, 24] – исследование влияния технологических параметров нанесения на структуру, физико-механические и трибологические свойства покрытий CrTiZrNbHf и (CrTiZrNbHf)N; [2] – участие в подготовке и проведении заводских испытаний редукторно-муфтового узла насосной станции продольно-фрезерного станка 6Г610 с покрытием CuCrMnFeCoNi, анализ результатов производственной апробации; [14] – анализ, обобщение и обсуждение результатов исследований в области вакуумных высокоэнтропийных покрытий.

Политыко Кирилл Николаевич

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТРИБОСИСТЕМ ПУТЕМ МОДИФИЦИРОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВАКУУМНЫМИ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 24.09.2026. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,39.
Тираж 100 экз. Заказ ____.

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