

*На правах рукописи*



**Воропаев Александр Иванович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРИНЦИПОВ ПОВЫШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ  
DLC-ПОКРЫТИЙ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ АЗОТОМ**

Специальность 2.5.3 –Трение и износ в машинах

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону

2024

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

Научный руководитель – **Колесников Игорь Владимирович** – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор РАН, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Нанотехнологии и новые материалы» научно-испытательного центра «Нанотехнологии и трибосистемы» НИЧ ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

Официальные оппоненты: **Панин Сергей Викторович** – доктор технических наук, профессор, заведующий лаборатории механики полимерных композиционных материалов ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, г. Томск

**Фоминов Евгений Валерьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина», г. Москва

Защита состоится « 23 » декабря 2024 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета 44.2.005.01 на базе ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, конференц-зал.

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

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



П.Н. Щербак

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** Известно, что безопасная, надежная и высокая работоспособность транспортных средств, механизмов различных машин в значительной мере определяется износостойкостью поверхностного слоя узлов трения.

Сложность изучения и обеспечения устойчивой работы трибосистем объясняется тем, что внешнее трение – достаточно сложный процесс контактного взаимодействия поверхностных слоев, изменяющихся под действием внешнего воздействия.

В этой связи весьма актуальной является потребность в создании на поверхностях трения структур, обладающих высокой износостойкостью. Эта задача решается путем формирования вакуумных ионно-плазменных покрытий (ВИП), и в том числе разработки концепции нанесения алмазоподобных покрытий (DLC) и отработки их технологического режима. Формирование заданного уровня физико-механических и трибологических характеристик стальных поверхностей трения путем получения устойчивых значений толщины алмазоподобных покрытий позволяет получить поверхностную структуру трибосистемы принципиально новую и отличную от исходной.

Здесь важным является исследование соотношения графитной гибридации  $sp^2$  с алмазной  $sp^3$  по всей толщине покрытия. Это свойство DLC-покрытий открывает перспективу научного поиска оптимальной структуры покрытия для различных сфер трибологического применения, определяет научный интерес диссертации и является аргументом для обоснования выбора ее объекта исследования – в нашем случае это механизм управления стабилизатором вертолета МИ-35.

Весьма актуальным является определение оптимальной технологии использования азота для стабилизации углеродных покрытий вместо взрывоопасного водорода с целью получения устойчивых значений толщины DLC-покрытий. Такой подход позволит приблизиться к решению проблемы надежного прогнозирования физико-механических и трибологических свойств DLC-покрытий.

Об актуальности и важности таких исследований говорит тот факт, что они были поддержаны грантами Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 14.607.21.02.03); Российского научного фонда (проект РНФ № 21-79-30007).

**Степень разработанности проблемы.** В историческом развитии наука о трении и износе прошла путь в исследованиях от макроуровня причин разрушения до наноуровня трибодинамики механизмов изнашивания.

В последние годы в исследованиях процессов трения все большее предпочтение уделяется не только попыткам проникнуть на атомно-молекулярный уровень протекающих процессов на трибоконтakte, но и разработке материалов, технологий и режимов модифицирования поверхности трибоконтakta с помощью нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий, в том числе и алмазоподобных. Научными лидерами в области нанесения износостойких,

сверхтвердых покрытий в России являются известные научные школы МАИ (А. А. Лозован); НИАТ (Л. М. Петров, В. В. Плихунов); СоРАН, г. Томск (А. В. Панин, С. В. Панин, А. В. Колубаев, Е. А. Колубаев); СТАНКИН (С. Н. Григорьев, С. В. Федоров); МЭИ (В. А. Рыженков), а за рубежом – НАН Беларуси (А. В. Белый, Н. К. Мышкин, Г. Д. Карпенко); университетские лаборатории в Чехии (J. Musil, S. Veprek, H. Zeman), Великобритании (P. Eh. Novse-rian, Q. Luo, W. D. Munz, Sheffield Hallam), Португалии (A. Cavaleiro, Coimbra), разработки которых в основном ориентированы на узлы авиационной техники (главным образом, лопасти газотурбинных двигателей), режущего инструмента, энергетического машиностроения (лопатки паровых турбин, запорная арматура трубопроводов). Что касается триботехнического применения ионно-плазменных покрытий, то здесь в первую очередь следует отметить активную и успешную работу ученых из России: А. Ю. Албагачиева, Н. А. Азаренкова, В. И. Бутенко, В. Д. Вермеля, И. Г. Горячевой, И. С. Гершмана, О. Ю. Елагиной, В. И. Ерофеева, С. Н. Захарова, Ю. К. Машкова, А. Г. Наумова, А. Д. Погребняка, П.А. Тополянского, В. М. Шулаева, а также их коллег из Китая, Франции, США – J. Robertson, S. Miyake и др.

Вместе с тем нерешенных вопросов очень много – это и анализ критериев выбора типа покрытия, и определение свойств и технологий их нанесения, и подбор толщины покрытия в зависимости от шероховатости поверхности, и поиск оптимальной структуры покрытия, и определение методов увеличения адгезии к поверхности трибосопряжения – все это с целью повышения физико-механических и трибологических параметров трибосистемы в целом.

**Объект исследования.** Решение обозначенной в диссертации цели и поставленных задач будет проиллюстрировано для ответственного трибосопряжения вертолета МИ-35 – элемента механизма управления стабилизатором «червяк-барабан» путем применения разработанной технологии модифицированных поверхностей трибосопряжения.

**Предметом исследования** является разработка методов и режимов нанесения алмазоподобных покрытий, обеспечивающих высокие эксплуатационные параметры тяжело нагруженных трибосистем – низкий коэффициент трения и высокую износостойкость.

**Цель работы.** Установление теоретических и экспериментальных закономерностей повышения физико-механических и трибологических характеристик тяжело нагруженных металлических трибосистем путем использования углеродных высоковакуумных покрытий семейства DLC, стабилизированных азотом. Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1. Установление универсальных зависимостей между технологическими параметрами вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий и их свойствами во взаимосвязи с соотношением величин гибридизации  $sp^3/sp^2$ .
2. Разработка методов прогнозирования свойств DLC-покрытий и оптимизации режимов их нанесения путем применения методов моделирования и планирования экспериментов, а также использования нейросетевых алгоритмов и

искусственного интеллекта для решения проблемы многопараметричности и устойчивого управления вакуумным ионно-плазменным нанесением покрытий с широким спектром применения в триботехнике.

3. Исследование стабилизации растворенными атомами азота толщины DLC-покрытий, влияющей на физико-механические и трибологические свойства покрытий.
4. Установление зависимостей между технологическими параметрами нанесения DLC-покрытий и их физико-механическими и трибологическими свойствами.
5. Исследование влияния комбинированных покрытий, в частности, систем TiAlN/DLC и CrAlSiN/DLC, на трибологические параметры трибосистемы – коэффициент трения и износостойкость.
6. На основе аналитических и экспериментальных исследований оптимизация параметров нанесения износостойких DLC-покрытий, стабилизированных азотом, для повышения надежности и безопасности работы механизма управления стабилизатором вертолета МИ-35.

**Методы исследования.** Для успешного выполнения поставленных задач использованы прогрессивные технологии вакуумных ионно-плазменных покрытий, современные фундаментальные достижения в области материаловедения, физики и химии трения, а также современная экспериментальная база и методики изучения свойств, состава и строения поверхностных слоев трущихся сопряжений: динамическое наноиндентирование – для исследования механических свойств твердых тел с использованием измерительной платформы Nano-Test 600, рентгеновская фотоэлектронная и оже-электронная спектроскопия (РФЭС и ОЭС), микроскоп LEXT OLS5000 для определения морфологии, микрорельефа и анализа поверхности трения, установка BRV600 с модулями магнитного сепаратора и присоединенного углеродного блока для нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий, микроскопы ZEISS EVO MA 18 и двулучевой (электронный/ионный) ZEISS CrossBeam 340, оснащенные энергодисперсионными рентгеновскими детекторами (EDAX) модели X-Max 50N, установка для испытания на трение и износ TRB и ИИ5018, а также на заводском стенде для испытаний покрытий в механизма управления стабилизатором вертолета МИ-35.

**Научная новизна.** В результате комплексного теоретического и экспериментального исследований, научного обобщения полученных результатов, требуемых для определения критериев повышения износостойкости трибосистем, установлено прогнозируемое управление процессом получения вакуумных ионно-плазменных покрытий, а именно:

1. Показано, что использование подачи азота (%N = 5...8) в качестве технологического параметра при нанесении углеродных покрытий вместо взрывоопасного водорода обеспечивает:
  - структурную однородность покрытия (без образования нитридных фаз);
  - стабилизацию толщины DLC-покрытий на уровне 1,0...1,5 мкм;

- повышение физико-механических и трибологических характеристик покрытия.
2. Установлено, что применение многофакторного планирования эксперимента, а также машинного обучения и нейросетевых технологий позволило:
    - существенно сократить количество экспериментов, необходимых для обеспечения надежного прогнозирования свойств покрытий;
    - выделить главные технологические параметры при нанесении DLC-покрытий: подача азота %N, ток индукционных катушек  $\lambda$ , давление в камере  $P$  и время нанесения покрытия  $t$ ;
    - определить оптимальные значения технологических параметров, которые обеспечивают максимальные значения физико-механических свойств DLC-покрытий %N = 5...8 %;  $\lambda = 3,0...3,8$  А;
    - определить оптимальные значения технологических параметров, которые обеспечивают максимальный уровень прочности и износостойкости покрытий при трении: %N =  $5,0 \pm 0,5$  %,  $\lambda = 3,0 \pm 0,2$  А.
  3. Впервые получены, исследованы и оптимизированы для использования в нагруженных узлах трения комбинированные ионно-плазменные покрытия двухслойной морфологии CrAlSiN+DLC. Их эффективное трибологическое применение обусловлено повышением износостойкости за счет нитридного слоя и повышением антифрикционных характеристик за счет углеродного слоя.

#### **Теоретическая значимость работы:**

1. По результатам исследования с использованием математических методов планирования эксперимента и статистической обработки результатов сформирована *база данных* DLC-покрытий, включающая параметры технологии нанесения, параметры подложки, характеристики архитектуры и структуры покрытий, их физико-механические и трибологические свойства. Полученный массив данных позволил впервые апробировать перспективные цифровые аналитические инструменты в виде нейросетевых алгоритмов и преодолеть проблемы вакуумной ионно-плазменной технологии, связанные с неустойчивым распределением экспериментальных данных и многопараметричностью.
2. Показано, что значительное влияние на трибологические характеристики оказывает комплекс физико-механических свойств системы «подложка – подслой – покрытие». На основе полученных экспериментальных данных в качестве основного теоретического положения для оптимизации такой системы рекомендовано использовать соотношение значений сопротивления пластической  $H^3/E^2$  деформации компонентов системы (где  $H$  – твердость,  $E$  – модуль упругости).
3. Предложены научно-методические принципы оптимизации технологических режимов формирования системы «подложка – подслой – покрытие», в качестве основы которых использована методика ортогонального центрального композиционного плана (ОЦКП). Применение методики для системы «сталь 40ХН2МА – подслой Ti – DLC-покрытие» позволило получить оптимальные значения технологических параметров %N =  $5,5 \pm 0,5$  % и

$\lambda = 2,0 \pm 0,2$  А, обеспечивших высокую износостойкость и низкий коэффициент трения покрытий, а также внедрить результаты работы в производство.

4. Установлено, что для получения высокой износостойкости при использовании DLC-покрытий в тяжело нагруженных узлах трения необходимо использовать комбинированные покрытия – двухслойную систему, сочетающую наружный углеродный слой (DLC) с низким коэффициентом трения и износостойкий внутренний нитридный слой. Это теоретическое положение реализовано в работе путем формирования трибосистемы «сталь 40ХН2МА – подслой Cr – комбинированное покрытие CrAlSiN+DLC», где подслой Cr использован для лучшей адгезии нитридного компонента покрытия.

**Практическая значимость работы.** Разработаны и практически реализованы научно-методические принципы технологического обеспечения для целенаправленного повышения работоспособности трибосопряжений в ответственных узлах трения путем оптимизации технологических режимов формирования вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий различной архитектуры в зависимости от трибологических условий эксплуатации. Так, углеродные DLC-покрытия с подслоем Ti на стальной подложке рекомендованы для снижения коэффициента трения на контактной поверхности слабо- и средненагруженных трибосопряжений – при нагрузках  $F$ , эквивалентных нагрузкам проведенных трибологических испытаний  $F \leq 5 \text{ Н}^1$ . Для более высоких удельных нагрузок трения в трибоузлах транспортно-технологических средств по результатам выполненных трибологических испытаний рекомендованы комбинированные покрытия типа CrAlSiN+DLC с подслоем Cr.

На основе результатов проведенных исследований компании ПАО «Роствертол» предложена разработанная техническая и нормативная документация по применению технологических принципов использования вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий на основе DLC, стабилизированных азотом, для повышения износостойкости и надежности механизма управления стабилизатором вертолета МИ-35.

**Достоверность и обоснованность** научных результатов основывается на анализе исследований ранее выполненных работ по теме диссертации, на использовании методов математической статистики, результатов многофакторного планирования экспериментов и современных алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей. Аналитические исследования и выводы подтверждены экспериментальными данными электронной микроскопии высокого разрешения, рентгеноэлектронной и оже-электронной спектроскопии. Высокая согласованность аналитических исследований с данными лабораторных и стендовых испытаний является достоверным подтверждением полученных результатов.

**Апробация результатов.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях, в

---

<sup>1</sup> Удельная нагрузка  $P$  при 1Н = 451,2 МПа; 5Н = 771 МПа; 10Н = 972 МПа.

том числе: 15-й Международной конференции «Пленки и покрытия» (Санкт-Петербург, 2021), Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники» (Ростов-на-Дону, 2023), Международной конференции «Физика и механика новых материалов и их использование», 31-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии – 2024» (Санкт-Петербург, 2024), XVI международной научно-практической конференции «Научоёмкие технологии машиностроения, авиации и транспорта» (Ростов-на-Дону, 2024).

**Личный вклад соискателя состоит:** в отработке и оптимизации режимов осаждения вакуумных ионно-плазменных алмазоподобных покрытий; в формировании базы данных DLC-покрытий; в выполнении экспериментальных исследований структуры, физико-механических и трибологических свойств покрытий; в выявлении и построении экспериментальных зависимостей влияния технологических параметров нанесения покрытий на их свойства; в анализе полученных результатов с использованием методик планирования эксперимента и алгоритмов машинного обучения; в постановке и участии в проведении стендовых испытаний по применению ионно-плазменных покрытий для повышения износостойкости и надежности узлов трения изделий номенклатуры ПАО «Роствертол».

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Работа соответствует паспорту специальности 2.5.3. – Трение и износ в машинах» по следующим направлениям исследований: п. 7. Триботехнические свойства материалов, покрытий и модифицированных поверхностных слоев; п. 10. Физическое и математическое моделирование процессов трения и изнашивания. Расчет и оптимизация узлов трения и сложных трибосистем; п. 16. Материалы трибологического назначения. Исследования и разработка.

**Публикации.** Основные положения и результаты исследований опубликованы в 18 печатных работах, из них 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, и 5 – в международных базах цитирования Web of Science и Scopus, а также в 1 патенте РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 139 источников, и пяти приложений. Работа изложена на 160 страницах, включает 37 рисунков и 4 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** к диссертации обоснована актуальность темы по разработке концепции нанесения алмазоподобных (DLC) покрытий и отработке технологического режима их осаждения с целью создания на поверхностях трения структур, обладающих высокой износостойкостью. Показано, что до настоящего времени отсутствуют исследования по выявлению соотношения графитной гибридизации  $sp^2$  с алмазной  $sp^3$  по всей толщине покрытия, что открывает перспективу научного поиска оптимальной структуры покрытия для различных



сфер трибологического применения. Отмечается актуальность и перспективность определения технологии использования азота для стабилизации углеродных покрытий вместо взрывоопасного водорода с целью получения устойчивых значений толщины DLC-покрытия. Во введении оценивается степень разработанности проблемы российскими и зарубежными учеными, а также обозначены объект и предмет исследования, цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также достоверность и обоснованность научных результатов.

**Первая глава** диссертации посвящена анализу современного состояния методов получения углеродных покрытий и их использования для повышения трибологических характеристик тяжело нагруженных трибосистем, представленных в работах российских и мировых школ – Беларуси, Китая, Японии, США, Южной Кореи, Сингапура.

В настоящее время внимание ученых-трибологов обращено к углеродным материалам, способным создавать прочные химические связи со многими элементами. В отношении покрытий большой интерес вызывают, в частности, вопросы стабилизации покрытий на основе углерода, легирования их металлами, диффузионной проницаемости нанокристаллических углеродных покрытий.

Анализ публикаций показывает, что наиболее технологичным способом получения углеродных покрытий семейства DLC является вакуумная ионно-плазменная технология. В решениях многих конференций и рекомендациях исследователей подчеркивается, что ионно-плазменная технология нанесения алмазоподобных покрытий на поверхность трения недостаточно исследована в трибологии и в то же время перспективна для применения в тяжело нагруженных трибосопряжениях транспортных систем, машин, механизмов, оборудования.

Обзор тематической научной литературы демонстрирует актуальность создания комбинированных покрытий класса  $MeC(MeN)/a-C:H$ , в частности, покрытий систем  $TiAlN/DLC$  и  $CrAlSiN/DLC$ , а также проведения исследований влияния таких покрытий на коэффициент трения и износостойкость узлов трения.

Проведенный анализ работ, посвященных различным углеродным покрытиям, подчеркивает важность всестороннего исследования механизмов изнашивания, процесса образования и эволюции трибослоя с включением его характеристик в состав оптимизационных признаков покрытия, с учетом стабилизации DLC-покрытия азотом и создания переходного модифицированного слоя между подложкой и покрытием.

**Вторая глава** диссертации полностью посвящена методическому обеспечению проведения исследований. В главе подробно изложена методика подготовки подложки к нанесению покрытий, описаны оборудование и режимы нанесения углеродных и комбинированных покрытий, методы аттестации состава и структуры покрытий, методы определения физико-механических и трибологических характеристик углеродных и комбинированных покрытий, а также методы статистической обработки данных, формирования и использования

базы полученных экспериментальных данных для реализации процедур машинного обучения.

В качестве основного материала образцов-подложек для нанесения углеродных покрытий была выбрана сталь 40ХН2МА, часто используемая в машиностроении для изготовления нагруженных узлов трения. В экспериментах были использованы образцы этой стали с сорбитной структурой (после закалки с высоким отпуском 600 °С, с твердостью  $H = 2,5$  ГПа) и с мартенситной структурой (после закалки с низким отпуском 200 °С, с твердостью  $H = 5,2$  ГПа). Тщательное изучение вариантов подложек обусловлено тем, что разница в физико-механических свойствах подложки и покрытия негативно сказывается на адгезии покрытий, что и определило в работе круг вопросов для исследования влияния границы «покрытие – подложка» на адгезию покрытий и их трибологические свойства.

Поскольку процесс нанесения покрытий является многопараметрическим, то в целях сокращения объема экспериментов, а также более точного анализа полученных результатов часть параметров должна быть фиксированной, другая часть – варьируемой. В качестве варьируемых параметров выбраны: давление в рабочей камере  $P = 0,011 \dots 0,31$  Па; ток индукционных катушек (соленоидов)  $\lambda = 1 \dots 5$  А, характеризующий объемную плотность мощности ионного потока осаждаемого углерода; величина подачи азота в камеру  $\%N = 1 \dots 20$  (определяется по регулятору подачи газа и может быть выражена в значениях парциального давления азота  $P_N$ ); время нанесения покрытия  $t = 10 \dots 35$  мин. В качестве фиксированных параметров стадии нанесения покрытия были приняты параметры источника испарения графита: лазер с задержкой импульса –  $Q_{sw} = 350$  мкс; напряжение разрядника – 300 В; частота лазера – 10 Гц; энергия лазерного излучения – 600...700 мДж; скорость сканирования катода – 1 мм/с. Лазерное сканирование выполнялось по торцевой поверхности цилиндрического катода из порошкового графита ВП-6, вращающегося вокруг оси цилиндра со скоростью 1 об/мин.

Основной объем исследования состава и структуры покрытий выполнялся с использованием методик растровой электронной микроскопии (РЭМ), микро-рентгеноспектрального анализа (РСА), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Для определения физико-механических свойств – твердости  $H$  и модуля упругости  $E$ , использовали метод непрерывного индентирования на измерительной платформе NanoTest 600. Трибологические испытания покрытий проводились на машине трения TRB по схеме «штифт – пластина», где жестко закрепленный на штифте шарик из металлокерамики (WC-Co) служил контртелом, а в качестве «пластины» выступал стальной образец с нанесенным покрытием.

Результаты выполненных исследований физико-механических и трибологических характеристик покрытий подвергались статистической обработке данных, далее они загружались в сформированную базу данных и анализировались с помощью методик регрессионного анализа, алгоритмов машинного обучения и нейросетевых технологий.

**Третья глава** диссертации посвящена выявлению и исследованию корреляционных связей физико-механических характеристик ионно-плазменных углеродных покрытий и технологических параметров осаждения покрытий, а также анализу возможностей их прогнозирования и оптимизации. Исследовано влияние таких параметров, как величина подачи азота в камеру  $\%N$ , ток индукционных катушек  $\lambda$ , давление в рабочей камере  $P$  и время нанесения покрытия  $t$ , на физико-механические характеристики покрытия – твердость  $H$  и модуль упругости  $E$ . Выбор для исследования указанных технологических параметров обусловлен не только их наибольшим влиянием на величины  $H$  и  $E$  по сравнению с множеством других параметров режима осаждения, но и возможностью их варьирования в широких пределах для выявления оптимума физико-механических свойств покрытий.

Первостепенное внимание было уделено параметру  $\%N$ , основное назначение которого – стабилизация роста покрытия в процессе осаждения. Одним из главных недостатков DLC-покрытий является быстрый рост внутренних напряжений в процессе осаждения покрытия. В силу аморфизованной структуры покрытия релаксация напряжений происходит в виде растрескивания уже при толщине  $\sim 500$  нм. Для практического трибологического применения покрытий такой толщины углеродного покрытия недостаточно. С целью стабилизации толщины покрытий традиционно используется подача водорода в вакуумную камеру, что делает процесс нанесения покрытий взрывоопасным. Азот, использованный в качестве стабилизатора структуры покрытий вместо водорода, обеспечивает получение устойчивых значений толщины DLC-покрытий вплоть до 1,5...2,0 мкм (рисунок 1). Причем при использованных в работе значениях парциального давления азот не приводил к образованию вторичных нитридных фаз в покрытии, тем не менее интенсивность его напуска в рабочую камеру, определяемая параметром  $\%N$ , оказывала существенное влияние на физико-механические характеристики покрытия. Поэтому величина  $\%N$  отнесена к наиболее важным управляющим технологическим параметрам формирования покрытия.

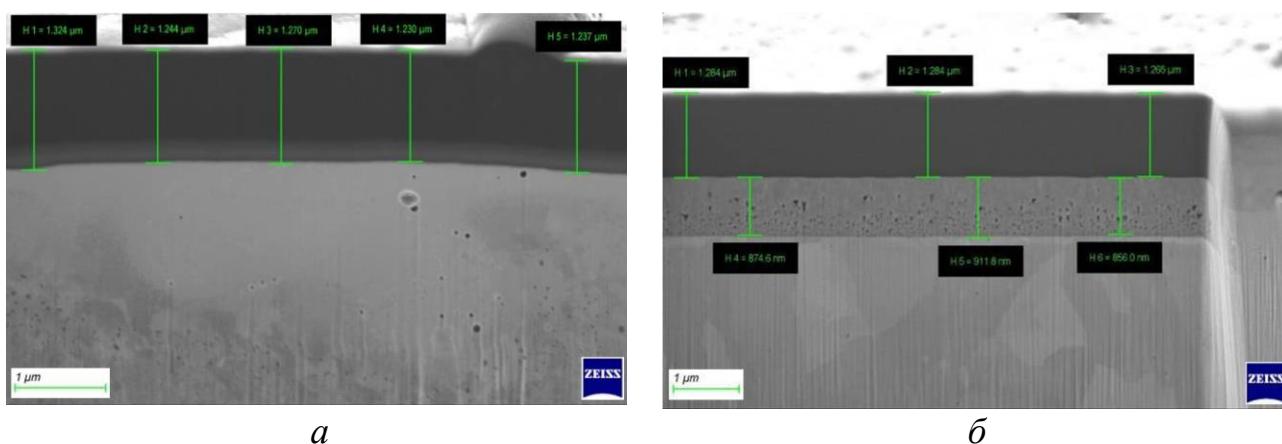


Рисунок 1 – Строение DLC-покрытий, стабилизированных азотом, в поперечном сечении (РЭМ, кросс-секции):

*а* – покрытие DLC без подслоя; *б* – покрытие DLC с подслоем TiN

Принадлежность углеродного покрытия к классу DLC характеризуется долей алмазной гибридизации  $sp^3$ , которая должна составлять не менее 70 %.

Значения  $sp^3$  в работе определялись методом РФЭС по известным методикам. Из обзорных спектров, снятых с поверхности покрытий (рисунок 2), были выбраны энергетические диапазоны для записи  $1s$ -линий углерода, азота и других элементов. Так, для регистрации C (KVV) оже-электронных спектров углерода был выбран диапазон кинетической энергии 230...301 эВ. Результаты количественного анализа углеродных покрытий, выполненного методом РФЭС, в целом по базе данных составили:

- элементный состав поверхности покрытия:  
72,2...92,4 ат.% C  $1s$ ; 2,0...16,5 ат.% N  $1s$ ; 5,6...12,0 ат.% O  $1s$ ;  
0,1...0,15 Na  $1s$ ; 0,1...0,2 Cl  $2p$ ; 0,1...0,3 S  $2p$ ,
- доля фракций электронной гибридизации углерода:  
алмаз  $sp^3$  –  $0,9^{+0,1}_{-0,22}$ ; графит  $sp^2$  –  $0,1^{+0,22}_{-0,1}$ .

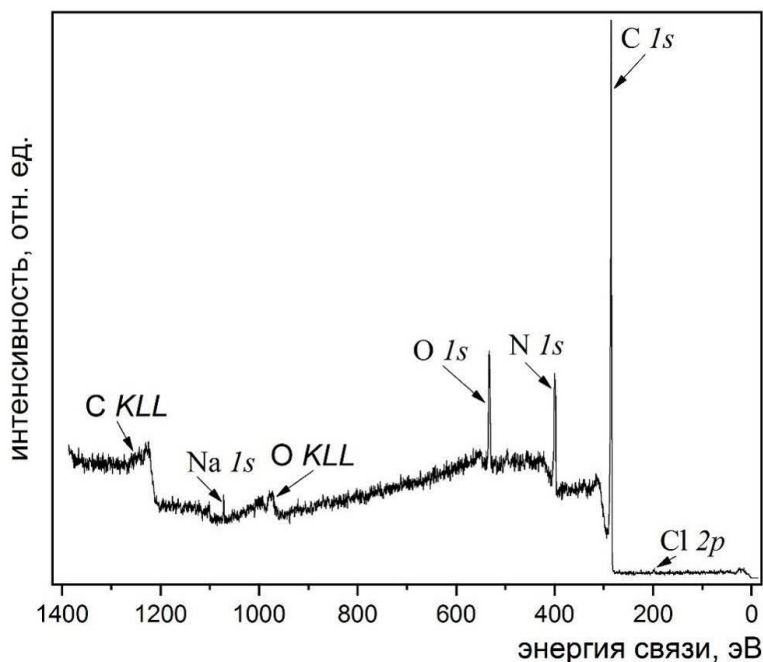


Рисунок 2 – Обзорный РФЭС-спектр, полученный с поверхности экспериментального углеродного DLC-покрытия

Таким образом, синтезированные на стальных образцах углеродные покрытия в соответствии с современными представлениями относятся к типу ta-C:N – тетраэдрического аморфного углеродного покрытия (DLC), стабилизированного азотом.

В результате исследования **физико-механических свойств DLC-покрытий** по статистически усредненным значениям базы данных были получены зависимости свойств  $H$ ,  $E$ ,  $H/E$  и  $H^3/E^2$  от технологических параметров %N,  $\lambda$ ,  $P$  и  $t$ , где отношения  $H/E$  и  $H^3/E^2$  характеризуют сопротивление покрытия упругой и пластической деформации. Полученные экспериментальные зависимости были аппроксимированы по методу наименьших квадратов (с по-

мощью программы свободного доступа МНК+) преимущественно в виде полиномов третьей степени (рисунок 3).

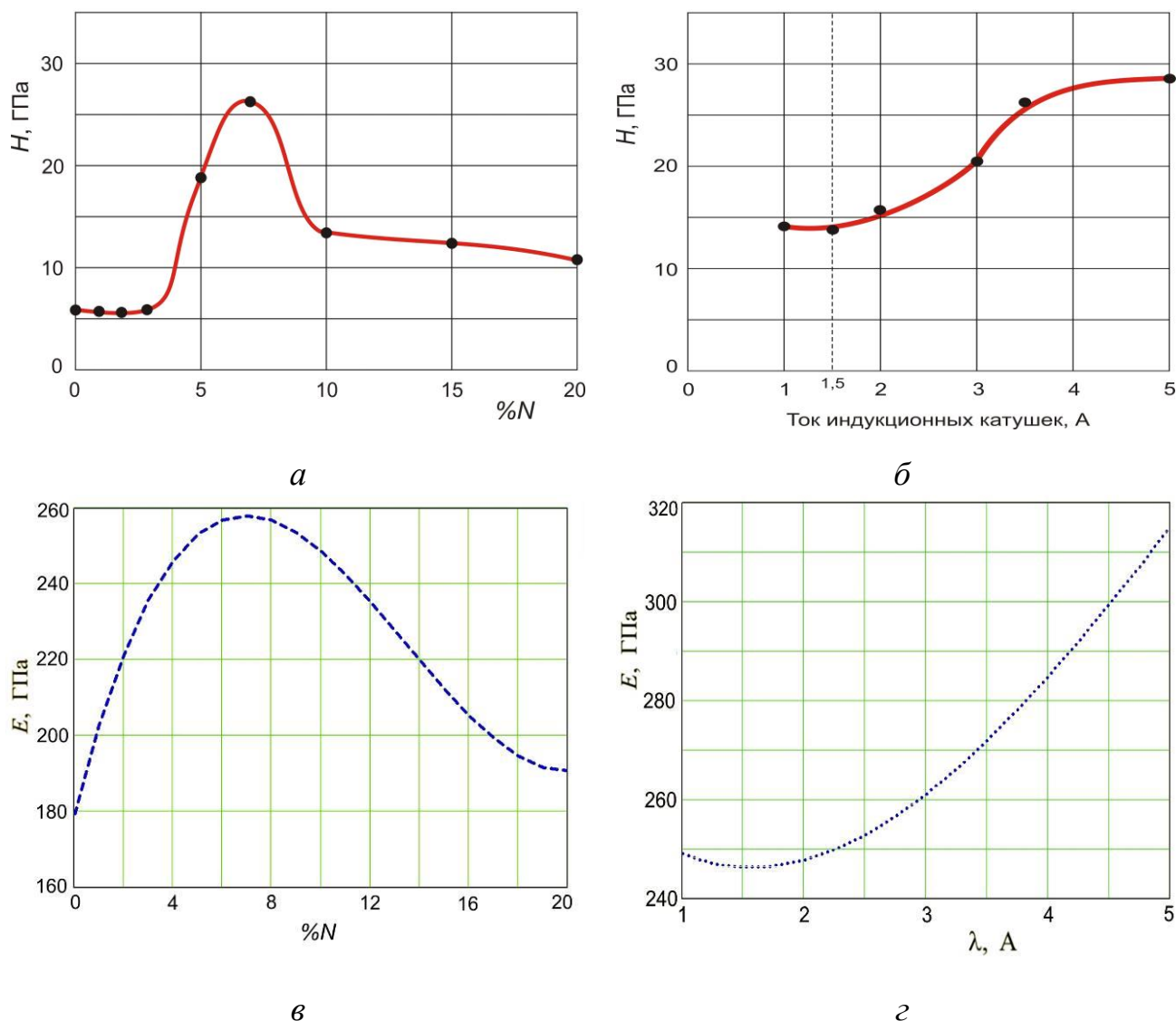


Рисунок 3 – Экспериментальные (*a*, *б*) и аппроксимационные (*в*, *г*) зависимости изменения твердости  $H$  (*a*, *б*) и модуля упругости  $E$  (*в*, *г*) DLC-покрытий от параметров нанесения – количества азота в камере  $\%N$  (*a*, *в*) и тока катушек соленоидов  $\lambda$  (*б*, *г*)

При достаточно большой выборке данных зависимости отношений  $H/E$  и  $H^3/E^2$  практически калькируют зависимости наиболее нестабильного компонента отношений, которым для ионно-плазменных покрытий является твердость  $H$ .

По результатам проведенных исследований с использованием статистических методов обработки экспериментальных данных и алгоритмов машинного обучения показано, что наиболее эффективное влияние на твердость  $H$  и модуль упругости  $E$  обеспечивается при бимодальном варьировании параметров  $\%N$  и  $\lambda$ . Выполненное исследование представляет собой последовательность этапов методического подхода: формирование базы данных покрытий с максимально широким перечнем характеристик и параметров нанесения; выявление

зависимостей влияния параметров на свойства покрытий, полученных с использованием методов статистической обработки данных; оптимизация полученных зависимостей на основе применения алгоритмов машинного обучения.

На основе полученных однопараметрических и бимодальных зависимостей были выделены области значений технологических параметров  $\%N$  и  $\lambda$ , в пределах которых на использованном в работе оборудовании с высокой степенью достоверности обеспечивается стабильный уровень физико-механических характеристик DLC-покрытий, определяемых методами непрерывного индентирования:

- область оптимальных значений варьируемых технологических параметров:  $\%N = 5 \dots 8$ ;  $\lambda = 3,0 \dots 3,8$  А;
- прогнозируемые физико-механические свойства углеродных DLC-покрытий:  $H \geq 18 \dots 20$  ГПа;  $E \geq 250$  ГПа;  $H/E \geq 0,07$ ;  $H^3/E^2 \geq 0,08$  ГПа.

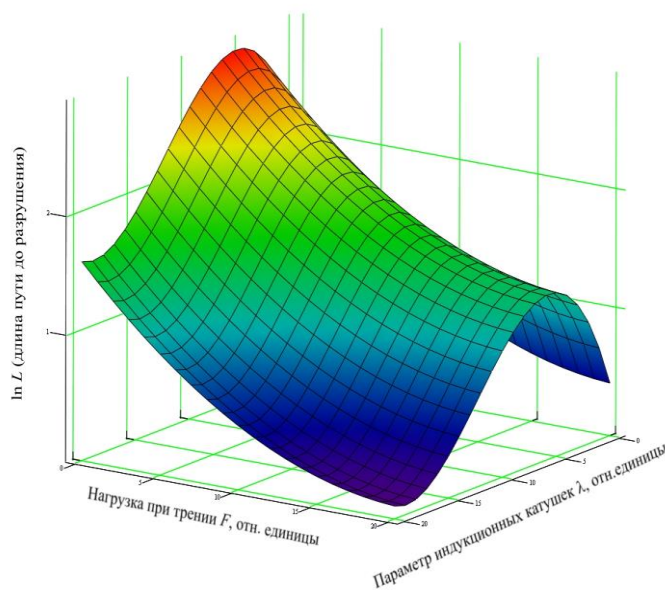
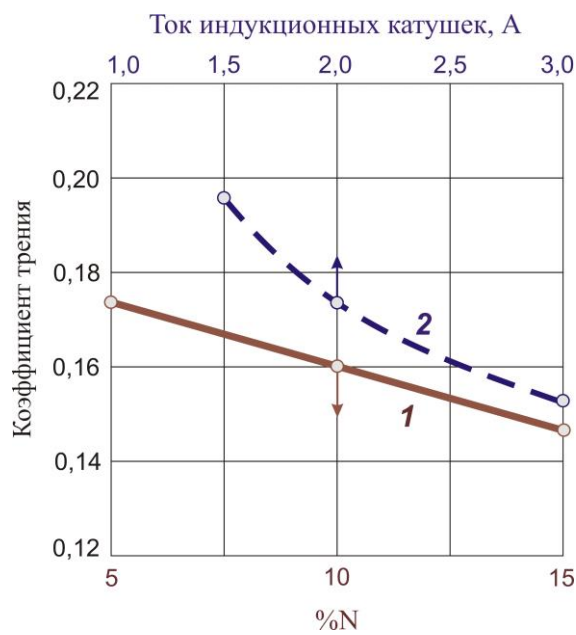
Указанный уровень физико-механических свойств покрытий может быть достигнут и за пределами приведенной области оптимальных значений параметров, однако в этом случае, как показывает цифровой анализ сформированной базы данных, устойчивая повторяемость значений этих свойств не гарантируется.

Достижение высокого комплекса физико-механических характеристик, выполненное в главе 3, может обеспечить высокую износостойкость только при определенных видах изнашивания, причем весьма немногочисленных, например, при абразивном.

**Четвертая глава** диссертации посвящена *трибологическим исследованиям* влияния технологических параметров  $\%N$  и  $\lambda$  на коэффициент трения и износостойкость покрытий на основе углерода (DLC), а также комбинированных покрытий (CrAlSiN+DLC) *в условиях испытаний на трение скольжения*. Принципиальным отличием от исследований, выполненных в главе 3, является то, что в этих условиях, помимо параметров  $\%N$  и  $\lambda$ , большое значение приобретает параметр нагрузки  $F$ .

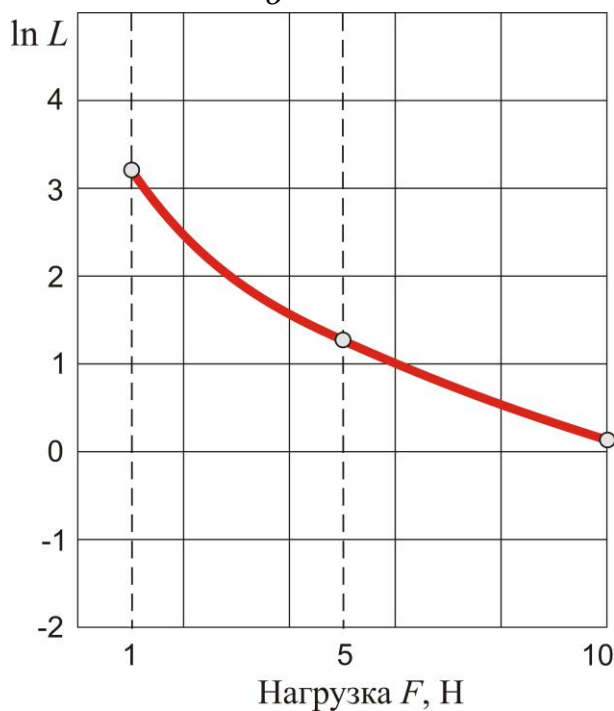
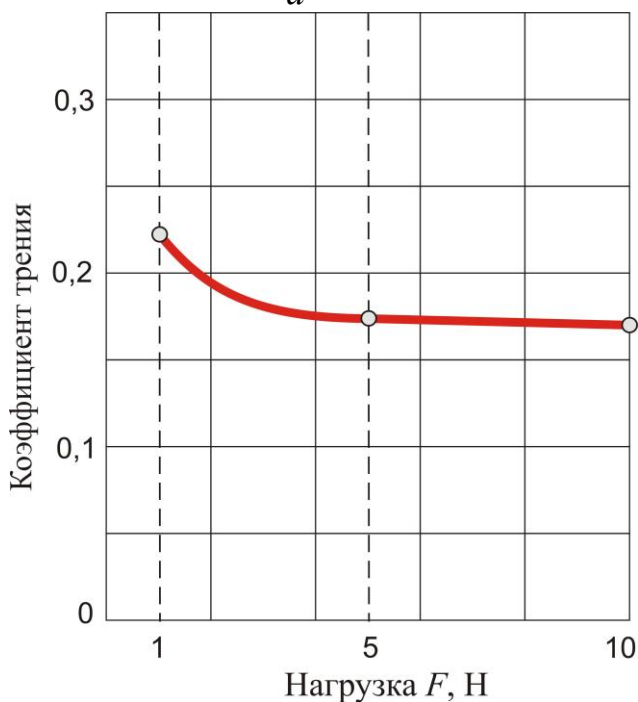
Полученные экспериментальные зависимости приведены на рисунке 4. С высокой точностью приближения они аппроксимированы в диссертации по методу наименьших квадратов с помощью программы МНК+ полиномиальными функциями первого, второго и третьего порядков. Значения величин  $F$  и  $\lambda$  на топологической поверхности рисунка 4, б приведены в относительных единицах, интервалы их истинных значений, задающих плоскость параметров, составляют  $F = 1 \dots 11$  Н и  $\lambda = 1 \dots 5$  А, причем максимум  $\ln L$  фиксируется при  $\lambda = 1,8 \dots 2,5$  А.

Анализ полученных экспериментальных данных – коэффициента трения  $\mu$  и длины пути трения  $L$  (до разрушения покрытия) – с использованием нейросетевых алгоритмов и машинного обучения позволил надежно определить интервалы оптимальных значений технологических параметров  $\%N = 5,5 \pm 0,5$  % и  $\lambda = 2,0 \pm 0,2$  А, которые, находясь в интервале значений оптимизации физико-механических свойств, приведенных в главе 3, для трибологических свойств смещены в сторону минимальных значений этого интервала.



а

б



в

г

Рисунок 4 – Экспериментальные зависимости изменения коэффициента  $\mu$  (а, в) и пути  $\ln L$  (б, г) трения DLC-покрытий от параметров нанесения – количества азота в камере %N (а), тока катушек соленоидов  $\lambda$  (а, б), и параметра трения – нагрузки  $F$ ; усредненные значения по всей базе данных DLC в целом

Полученные результаты показывают, что использование DLC-покрытий при повышении нагрузок  $F$  обеспечивает стабилизацию коэффициента трения на достаточно низком уровне  $\mu \approx 0,17$  (рисунок 4, в), в то время как износостойкость покрытия, выраженная величиной  $L$ , непрерывно убывает и при  $F \approx 5 \dots 10$  Н не превышает  $1 \dots 3$  м, что является очень низким показателем. В связи с этим, с целью повышения износостойкости покрытий при работе в нагруженных трибосопряжениях, были выполнены исследования **комбинированного**



**двухслойного покрытия CrAlSiN+DLC**, в котором высокая износостойкость нижнего нитридного слоя CrAlSiN сочетается с низким коэффициентом трения наружного слоя DLC. Технологические возможности вакуумной установки BRV600 позволяют наносить подобные покрытия за один технологический цикл, не перемещая образцы-подложки из вакуумной камеры.

Строение покрытий системы CrAlSiN+DLC приведено на рисунке 5. По составу слой CrAlSiN содержал: 18...19 ат.% Cr, ~10 ат.% Al, 5...6 ат.% Si, 35...40 ат.% N. Поскольку все компоненты слоя являются нитридообразующими, в нем формируется многофазная структура. Общая толщина комбинированных покрытий на исследованных образцах находилась в пределах  $h = 0,85...2,25$  мкм ( $h_{ср.} = 1,43$  мкм).

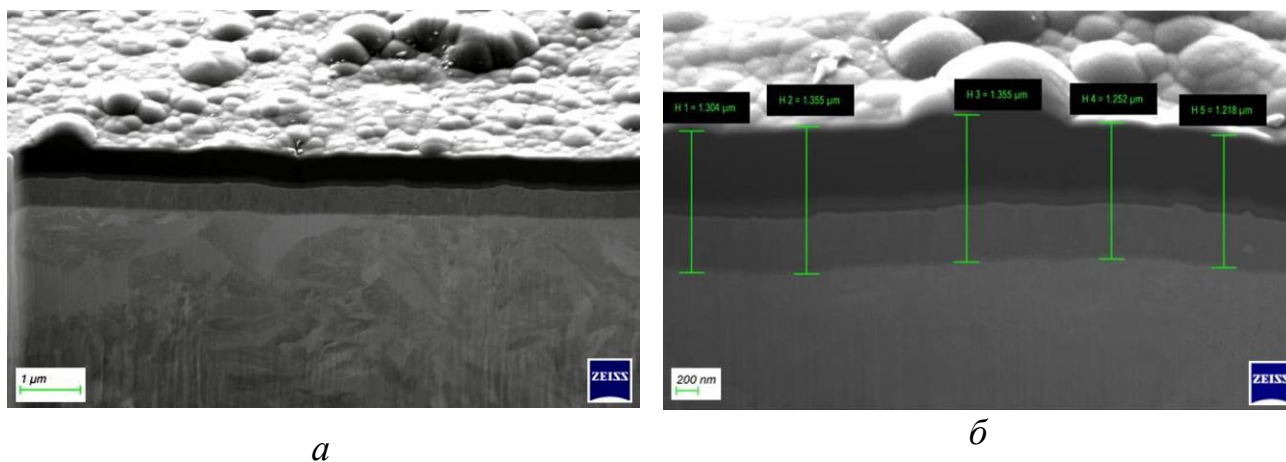


Рисунок 5 – Структура комбинированных покрытий CrAlSiN+DLC в поперечном сечении (РЭМ, кросс-секции):

- а* – общий вид сечения и поверхности покрытия;
- б* – измерение толщины покрытия

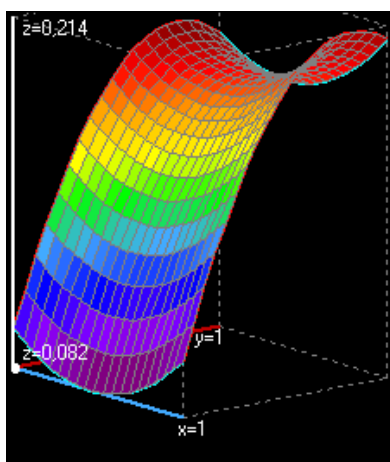
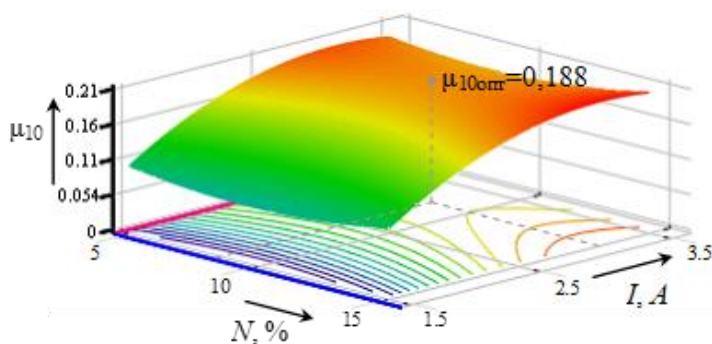
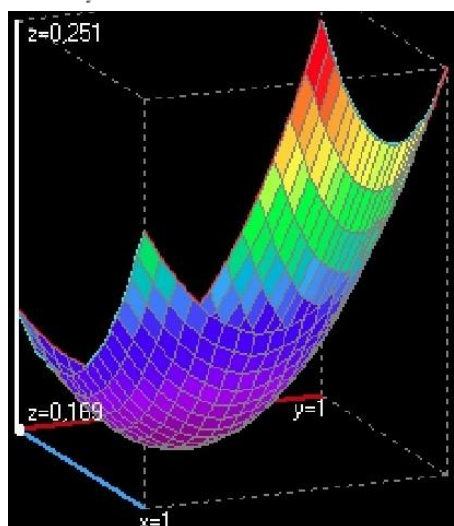
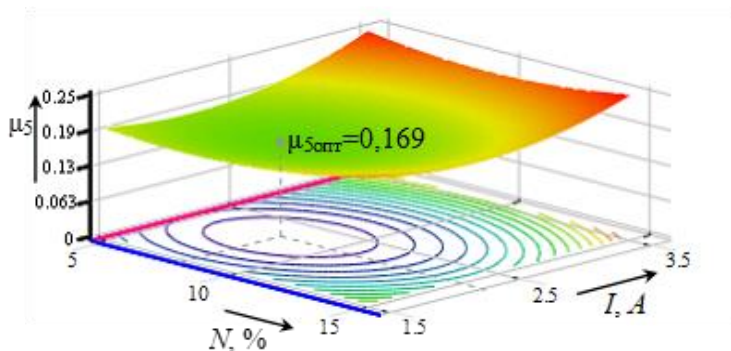
Для выявления зависимостей коэффициента трения  $\mu$  комбинированного покрытия от технологических параметров %N и  $\lambda$  был использован *метод регрессионного анализа* в соответствии с методикой ортогонального центрального композиционного плана двухфакторного эксперимента (ОЦКП-2) с применением программного модуля «Проект ОЦКП-2\_v.3». Особый интерес вызывает трибологическое поведение комбинированных покрытий при высоких нагрузках трения.

В отношении значений коэффициентов трения  $\mu_5$  при средних нагрузках ( $F = 5$  Н) и  $\mu_{10}$  при высоких нагрузках ( $F = 10$  Н) уравнения регрессии определяют минимальные значения коэффициентов трения соответственно:

- $\mu_5 = 0,169$  при значениях технологических параметров %N = 8,561 % и  $\lambda = 2,194$  А (показаны на рисунке 6);
- $\mu_{10} = 0,188$  при %N = 5,983 % и  $\lambda = 2,142$  А (показаны на рисунке 7).

Эти результаты практически соответствуют значениям параметров %N и  $\lambda$ , полученным при оптимизации DLC-покрытий для обеспечения значений коэффициента трения на минимальном уровне  $\mu \approx 0,17...0,19$  (см. выше).





*a* Рисунок 6 – Поверхности (*a, б*) и линии (*a*) равного уровня коэффициента трения  $\mu_5$  при нагрузке  $F = 5$  Н; показаны фрагменты окон программы «Проект ОЦКП-2\_v.3»: *a* – по всем осям указанные величины в натуральных значениях; *б* – плоскость факторов  $X_1$ – $X_2$  по осям  $x$  и  $y$  задана в кодовых единицах

*a* Рисунок 7 – Поверхности (*a, б*) и линии (*a*) равного уровня коэффициента трения  $\mu_{10}$  при нагрузке  $F = 10$  Н; показаны фрагменты окон программы «Проект ОЦКП-2\_v.3»: *a* – по всем осям указанные величины в натуральных значениях; *б* – плоскость факторов  $X_1$ – $X_2$  по осям  $x$  и  $y$  задана в кодовых единицах

Для верификации результатов исследования и статистического анализа были проведены трибологические испытания образцов с комбинированным покрытием CrAlSiN+DLC при нагрузке  $F = 10$  Н. Путь трения, пройденного об-

разцом до разрушения покрытия, составил  $L = 98$  м ( $\ln L = 4,585$ ) при максимальном коэффициенте трения  $\mu = 0,25$ . Это на порядок более высокая износостойкость, чем у покрытий чистого DLC в тех же условиях испытаний. При этом значения коэффициента трения у комбинированных покрытий и покрытий чистого DLC находятся примерно на одном уровне  $\mu = 0,17 \dots 0,19$ .

Полученные данные позволяют использовать комбинированные покрытия CrAlSiN+DLC для нагруженных трибосопряжений промышленных узлов трения. Помимо этого, выполненные в главе 4 исследования демонстрируют доказательства того, что технология вакуумного ионно-плазменного напыления углеродных DLC-покрытий может быть надежно управляемым процессом и рекомендована для повышения износостойкости узлов трения с широким диапазоном нагрузок, в том числе для тяжело нагруженных трибосистем.

**В пятой главе** диссертации показано, что выполненные исследования позволили установить закономерности образования высокопрочных и антифрикционных поверхностных слоев при нанесении алмазоподобных DLC-покрытий и комбинированных покрытий системы CrAlSiN+DLC. Производственные испытания показали перспективность их промышленного использования для увеличения ресурса эксплуатации особо ответственных и тяжело нагруженных узлов трения. Разработанная техническая и нормативная документация по применению технологических принципов использования вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий на основе DLC, стабилизированных азотом, по повышению работоспособности механизма управления стабилизатором вертолета МИ-35 прошла стендовую проверку и показала повышенную износостойкость покрытий в компании ПАО «Роствертол».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий путем применения на основе DLC, стабилизированных азотом, разработаны критерии создания широкого класса физико-механических и трибологических характеристик углеродных и комбинированных покрытий на поверхности трибоконтакта, что позволяет сделать основные выводы:

1. По результатам проведенных исследований оптимизирован четырехпараметрический комплекс вариативных технологических параметров нанесения покрытий DLC, включающих величину подачи азота в камеру %N, ток  $\lambda$  индукционных катушек, давление в рабочей камере  $P$  и время нанесения  $t$ . Установлено, что наиболее эффективные значения физико-механических характеристик (твердости  $H$ , модуля упругости  $E$ , сопротивления упругости  $H/E$ , сопротивления пластичности  $H^3/E^2$  DLC-покрытий, определяемых методами непрерывного индентирования) формируются путем варьирования основных технологических параметров – величины азота %N и тока  $\lambda$ , которые находятся в пределах:

- область оптимальных значений варьируемых технологических параметров: %N = 5...8 %;  $\lambda = 3,0 \dots 3,8$  А;
- прогнозируемые физико-механические свойства углеродных DLC-покрытий:  $H \geq 18 \dots 20$  ГПа;  $E \geq 250$  ГПа;  $H/E \geq 0,07$ ;  $H^3/E^2 \geq 0,08$  ГПа.

2. Полученные экспериментальные результаты показали, что азот, использованный в качестве стабилизатора структуры углеродных покрытий вместо водорода, является важным управляющим технологическим параметром процесса получения вакуумных ионно-плазменных DLC-покрытий и обеспечивает получение устойчивых значений толщины DLC-покрытий вплоть до 1,5...2,0 мкм.
3. Установлены закономерности формирования градиентного распределения электронных конфигураций углерода  $sp^3$  (алмазная составляющая) и  $sp^2$  (графитная гибридизация) по всей толщине DLC-покрытия, что дает возможность управлять не только износостойкостью, но и коэффициентом трения за счёт  $sp^2$ . С учётом установленных закономерностей показано, что:
  - углеродные покрытия с подслоем титана, полученные на подложке из стали 40ХН2МА по оптимальным режимам нанесения при значениях технологических параметров:  $\%N = 5,5 \pm 0,5 \%$  и  $\lambda = 2,0 \pm 0,2$  А, показывают высокую износостойкость и могут быть рекомендованы для прикладного использования в тяжело нагруженных трибосистемах;
  - при нанесении двухслойных комбинированных покрытий системы CrAlSiN+DLC оптимальные режимы нанесения слоя DLC для получения высокоизносостойких покрытий смещаются к границе наибольших значений интервала параметров  $\%N$  и  $\lambda$ , используемых для осаждения покрытий DLC с подслоем Ti. Эти комбинированные покрытия могут быть рекомендованы для повышения износостойкости тяжело нагруженных узлов трения транспортно-технологических средств.
4. Поскольку система нанесения покрытий является многопараметрической, то в целях сокращения объема экспериментов была разработана методика формирования базы полученных экспериментальных данных для их статистической обработки и реализации процедур машинного обучения, что позволило оптимизировать параметры нанесения покрытий и надежно прогнозировать их трибологические свойства, в частности, коэффициент трения  $\mu$  в интервале 0,17...0,19 для двухслойных комбинированных покрытий CrAlSiN+DLC и чистых DLC-покрытий.
5. Установленные в диссертации закономерности влияния технологических параметров нанесения на свойства комбинированных покрытий CrAlSiN+DLC прошли апробацию в компании ПАО «Роствертол». Стендовые испытания механизма управления стабилизатором МИ-35 с модифицированным комбинированным покрытием CrAlSiN+DLC позволили повысить износостойкость в 2 раза при эксплуатационной нагрузке 980 Н и 2,4 млн циклов, что соответствует 4000 ч. налета вертолета МИ-35.

### **Перспективы дальнейших исследований по данной работе**

Перспективным направлением развития исследований, связанных с использованием углеродных ионно-плазменных покрытий семейства DLC, является отработка технологических режимов для получения покрытий с прогнозируемым уровнем теплопроводности, а также методики аналитического расчета

теплопроводности покрытий в таких пленках, что весьма важно для теплозащитных, термобарьерных, трибологических материалов.

Базируясь на опыте полученных в настоящей работе результатов в качестве перспектив продолжения исследования автор предполагает:

– моделирование свойств покрытия путем изменения электронных конфигураций углерода за счет отношения  $sp^3/sp^2$ ;

– использование в ионно-плазменной установке нескольких катодов в сочетании с лазерным испарением графита позволит формировать износостойкие легированные композиционные покрытия разных по составу и архитектуре для ответственных трибосопряжений в авиаракетной технике;

– проведение испытаний образцов с ионно-плазменными покрытиями, нанесенными на подложку из высококачественной конструкционной стали, в широком диапазоне отрицательных и положительных температур с использованием разработанного и запатентованного трибологического комплекса при участии автора диссертации;

– для решения проблемы надежного прогнозирования свойств DLC-покрытий, связанных с большим количеством факторов, определяющих работоспособность покрытия необходимо разработать современный цифровой инструмент с использованием регрессионного анализа, методов машинного обучения и алгоритмов нейросетевых технологий широкого применения для материалов и технологий в современной инженерии поверхности.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

#### *Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ*

1. Повышение износостойкости тяжело нагруженных трибосистем путем применения комбинированных ионно-плазменных алмазоподобных покрытий: CrSiAln+DLC при стабилизации азотом / **А.И. Воропаев** // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024, №3. – С. 17–27. DOI 10.46973/0201–727X\_2024\_3\_17.
2. Покрытия DLC, стабилизированные азотом: оптимизация свойств и режимов нанесения с использованием алгоритмов рандомизированных деревьев и нейронных сетей / **А. И. Воропаев**, В. И. Колесников, О. В. Кудряков, В. Н. Варавка, И. В. Колесников, М. С. Лифарь, С. А. Гуда, А. А. Гуда, А. В. Сидашов // Физическая мезомеханика. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 16–32. – DOI 10.55652/1683-805X\_2024\_27\_2\_16-32.
3. Особенности структурно-фазового состояния и свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий системы Cr-Al-Si-N / В. И. Колесников, О. В. Кудряков, В. Н. Варавка, А. В. Сидашов, И. В. Колесников, Д. С. Мантуров, **А. И. Воропаев** // Физическая мезомеханика. – 2022. – Т. 25, № 6. – С. 26–38. – DOI 10.55652/1683-805X\_2022\_25\_6\_26.
4. Особенности формирования и прогнозирования триботехнических свойств ионно-плазменных алмазоподобных покрытий при стабилизации азотом / В. И. Колесников, О. В. Кудряков, **А. И. Воропаев**, И. В. Колесников, В. Н. Варавка, М. С. Лифарь, А. А. Гуда, Д. С. Мантуров, Е. С. Новиков // Трение

и износ. – 2024. – Т. 45, № 1. – С. 16–28. – DOI 10.32864/0202-4977-2024-45-1-16-28.

5. Повышение износостойкости тяжело нагруженных трибосистем путем формирования структуры и свойств их контактных поверхностей / В. И. Колесников, Ю. Ф. Мигаль, И. В. Колесников, А. П. Сычев, **А. И. Воропаев** // Наука Юга России. – 2022. – Т. 18, № 4. – С. 59–65.
6. Инновационные технологии повышения износостойкости тяжело нагруженных трибосистем путем формирования структуры и свойств их поверхностного слоя / В.И. Колесников, И.В. Колесников, Д.С. Мантуров, **А.И. Воропаев** // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2024, № 8(158). – С. 3–11.

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

7. The application of strengthening vacuum ion-plasma treating for the surface layer of constructional metal materials in mechanical engineering and the features of its formation / V. N. Kravchenko, E. S. Novikov, **A. I. Voropaev**, L. M. Petrov, S. B. Ivanchuk // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Article no. 012040.
8. Influence of the electronic structure of carbon (diamond-like) thin films on tribological characteristics / V. I. Kolesnikov, O. V. Kudryakov, I. Yu. Zabiya, E. S. Novikov, **A. I. Voropaev** // Journal of Physics: Conference Series, 1954. – 2021. – Article no. 012018. – DOI 10.1088/1742-6596/1954/1/012018.
9. Structural-Phase State and Properties of Cr-Al-Si-N Coatings Obtained by Vacuum Arc Plasma Deposition/ V. I. Kolesnikov, O. V. Kudryakov, V. N. Varavka, A. V. Sidashov, I. V. Kolesnikov, D. S. Manturov, **A. I. Voropaev** // Physical Mesomechanics. – 2023. – Vol. 26, No. 2. – P. 126–136. – DOI 10.1134/S1029959923020029.
10. Comparative Analysis of Tribological Nitride and Carbon PVD Coatings Deposited on a Nitrided Steel Substrate / V. I. Kolesnikov, O. V. Kudryakov, V. N. Varavka, **A. I. Voropaev**, E. S. Novikov // Lecture Notes in Mechanical Engineering (LNME). Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2023) ; A. A. Radionov and V. R. Gasiyarov (Eds.): ICIE 2023, LNME. – 2023. – P. 415–424. DOI 10.1007/978-3-031-38126-3\_42.
11. Multi-parameter Assessment of Wear Resistance of Antifriction Ion-plasma Coatings Deposited on a Cemented Steel Substrate. In book: Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications / **A. I. Voropaev**, O. V. Kudryakov, V. N. Varavka, V. I. Kolesnikov, I. V. Kolesnikov, E. S. Novikov // Proceedings of the International Conference PHENMA-2023, Springer Proceedings in Materials ; Ivan A. Parinov, E. P. Putri, S.-H. Chang (Eds.), Springer Nature Switzerland AG. – 2024. – Vol. 41, Chapt. 40. – P. 424–433.

*Патент:*

12. **Патент RU 2740591 C1**. Способ получения многослойных износостойких алмазоподобных покрытий / В. И. Колесников, А. П. Сычев, И. В. Колесни-

ков, А. А. Сычев, П. Д. Мотренко, П. П. Ковалев, **А. И. Воропаев**. – № 2020118608 ; заявл. 27.05.2020 ; опубл. 15.01.2021, Бюл. № 2. – 9 с.

*Публикации в других изданиях:*

13. Покрытия DLC, стабилизированные азотом / **А. И. Воропаев** // Альманах. 2024. № 8-3(118). С. 36-43.
14. Анализ базы данных углеродных покрытий с использованием алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей / **А.И. Воропаев** // Материалы Международной заочной научно-практической конференции «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ НОВЫЙ ВЗГЛЯД» (г. Нефтекамск, 19 сентября 2024 г.). – Нефтекамск: Научно-издательский центр «Мир науки». – С. 21-32.
15. Влияние электронной структуры углеродных (алмазоподобных) тонких пленок на трибологические характеристики / В. И. Колесников, О. В. Кудряков, И. Ю. Забияка, Е. С. Новиков, **А.И. Воропаев** // Пленки и покрытия – 2021 : труды 15-й Международной конференции, 18–20 мая 2021 г. / под редакцией д. т. н. В. Г. Кузнецова. – Санкт-Петербург : Изд-во ООО «РПК «АМИГО-ПРИНТ», 2021. – С. 70–74.
16. Структура и свойства углеродных ионно-плазменных покрытий, полученных лазерным испарением графита / Д. Д. Ловягин, **А. И. Воропаев**, О. В. Кудряков, Э. А. Ядрец, А. В. Рожик // Актуальные проблемы науки и техники – 2023 : материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 15–17 марта 2023 г. / ответственный редактор Н. А. Шевченко. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2023. – С. 491–492.
17. Multi-parameter Assessment of Wear Resistance of Antifriction Ion-plasma Coatings Deposited on a Cemented Steel Substrate / A. I. Voropaev, O. V. Kudryakov, V. N. Varavka // 2023 International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications”(PHENMA 2023) : Abstracts and Schedule (Surabaya, Indonesia, October 3–8, 2023) / I. A. Parinov, E. P. Putri, S.-H. Chang (Eds.) ; Southern Federal University. – Rostov-on-Don ; Taganrog : Southern Federal University Press, 2023. – P. 316–317.
18. Вакуумная установка для получения ионно-плазменных покрытий трибологического назначения / К. Н. Политыко, **А. И. Воропаев**, Д. С. Мантуров // Вакуумная техника и технологии – 2024 : труды 31-й Всероссийской-научно-технической конференции с международным участием, 25–27 июня 2024 г. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 141–144.

**Личный вклад соискателя.** Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. В работах с соавторами личный вклад соискателя заключается в следующем: [1–18] – разработка режимов нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий; [2, 14] – выполнение поиска закономерностей в базе экспериментальных данных и прогнозирования значений твердости покрытий DLC с помощью алгоритмов машинного обучения, обобщение результатов исследования; [3, 11] – исследование строения покрытия ме-

тодом СЭМ; [4, 5, 10, 15] – проведение трибологических испытаний; [7, 17, 18] – анализ и обобщение результатов; [1, 6, 8, 13] – исследование физико-механических и трибологических характеристик DLC-покрытий, обобщение физико-механических и трибологических результатов; [9] – проведение рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии; [12, 16] – проведение сравнительного анализа физико-механических и трибологических результатов методом многопараметрической оптимизации покрытий.

**Воропаев Александр Иванович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРИНЦИПОВ ПОВЫШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ  
DLC-ПОКРЫТИЙ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ АЗОТОМ**

Автореферат диссертации  
на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 11.10.2024. 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, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка  
Народного Ополчения, зд. 2.