

## **О Т З Ы В**

### **официального оппонента**

на диссертацию Воропаева Александра Ивановича  
«Исследование и разработка технологических принципов повышения функциональных характеристик трибосопряжений при использовании DLC-покрытий, стабилизированных азотом», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах

#### **1. Актуальность темы диссертационного исследования**

Тема создания новых функциональных материалов всегда была и будет актуальной как для промышленности, так и с научной точки зрения. В рассматриваемой диссертационной работе решается задача создания нового вида износостойких покрытий триботехнического назначения путем использования технологии вакуумного ионно-плазменного напыления. Применение углеродных ионно-плазменных покрытий класса DLC на контактных поверхностях трибосопряжений позволяет существенно снизить коэффициент трения и добиться высокой износостойкости при трении. Однако к настоящему времени не удается получить симбиоз физико-механических и трибологических характеристик ионно-плазменных покрытий для того, чтобы эффективно применять их в тяжело нагруженных узлах трения. Запросы промышленности на проведение таких исследований весьма многочисленны и их актуальность со временем будет только возрастать, например, для мощных турбинных энергетических установок, для двигателе- и вертолетостроения, для многоразовых пусковых ракетных установок и для других отраслей и агрегатов, эксплуатирующих нагруженные трибосопряжения. Поэтому тема диссертационного исследования, с одной стороны, весьма актуальна и перспективна с точки зрения расширения сфер использования покрытий DLC в узлах трения. А с другой стороны, представляет собой сложную многоуровневую научную проблему, связанную с мультипараметричностью ионно-плазменной технологии и неравновесными, трудно прогнозируемыми процессами, происходящими в плазме при напылении покрытий и на контактной поверхности покрытий при трении.

#### **2. Структура, объем и форма изложения диссертации**

Диссертация А.И. Воропаева состоит из введения, пяти глав, восемнадцати разделов, общих выводов, списка использованных источников и шести приложений. По главам и разделам материалы размещены пропорционально, в соответствии с решаемыми задачами исследования и логикой научных подходов, заявленных в работе.

Список использованной литературы насчитывает 139 наименований, из которых 74 приходится на иностранные источники. В приложениях размещены результаты экспериментов в виде баз данных и полученных графических зависимостей физико-механических и трибологических свойств покрытий, а также некоторые результаты

планирования эксперимента и документальное сопровождение проведенных исследований.

### **3. Краткая характеристика содержания диссертации**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы, приведены объект и предмет исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, подтверждена достоверность результатов и указан личный вклад автора в выполненные исследования. Приводятся сведения об апробации работы и публикациях, структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** выполнен анализ современного состояния методов получения углеродных покрытий и их использования для повышения работоспособности нагруженных трибосопряжений. Приведены классификация, методы получения, особенности строения, свойств и области применения углеродных материалов и покрытий. Отмечается, что перспективы их прикладного использования тесно связаны с технологиями получения, поэтому применение алмазоподобного углерода в виде DLC-покрытий тесно связано с особенностями и преимуществами вакуумной ионно-плазменной технологии. В обзоре большое внимание уделено особенностям поведения углеродных покрытий при использовании на контактных поверхностях узлов трения. Подчеркивается, что в соответствии с литературными данными трибологическое поведение углеродных покрытий контролируется переходным слоем, формирующимся в процессе трения и представляющим собой модифицированный верхний слой покрытия – контактный трибослой, состояние которого в большой степени определяет износостойкость покрытий DLC. Особо актуален этот вопрос для покрытий сложного состава, например, для углеродных покрытий, легированных атомами переходных металлов.

По результатам обзорной первой главы автором сформулированы задачи исследования. В частности, отмечается, что управление процессом получения вакуумных ионно-плазменных покрытий представляет собой серьезную проблему в современной инженерии поверхности, связанную с большим количеством факторов различной природы, определяющих работоспособность покрытия. На решение этой проблемы направлена задача установления универсальных зависимостей между группой вариативных технологических параметров и свойствами покрытия, которые помогут сократить общее число управляющих параметров. Решение этой задачи невозможно без решения проблемы стабилизации толщины покрытий, которая в настоящее время решается путем использования водорода в вакуумной камере, что создает взрывоопасность процесса напыления. Идея применения азота вместо водорода для устранения пожаро- и взрывоопасности ионно-плазменной технологии является одной из наиболее значимых в научном содержании диссертации. Дополняет триаду основных и наиболее перспективных направлений исследований, вытекающих из представленного обзора, обоснование актуальности создания и исследования комбинированных покрытий на базе DLC, в частности, покрытий систем TiAlN/DLC и CrAlSiN/DLC.

**Во второй главе** подробно представлены методические основы работы. Описан и обоснован выбор материала подложки, охарактеризованы материалы испаряемых катодов, представлены режимы нанесения углеродных покрытий с разделением технологических параметров на фиксированные и вариативные. Вариативные параметры, такие как доля вводимого азота  $\%N$ , ток индукционных катушек  $\lambda$ , давление в рабочей камере  $P$ , время напыления  $t$ , рассматриваются в диссертации в качестве основных входных дескрипторов при цифровом анализе полученных баз данных методами машинного обучения. Приведены методики исследования состава, структуры и физико-механических свойств полученных покрытий, методика трибологических испытаний на трение скольжением, а также изложены общие принципы статистической обработки экспериментальных данных, планирования эксперимента, методов машинного обучения, использованных в диссертации.

**В третьей главе** представлены результаты исследований, выполненных по трем направлениям. Экспериментально показано, что азот, в относительно небольших количествах вводимый в вакуумную камеру при напылении углеродных покрытий, стабилизирует рост покрытия до толщин в несколько микрометров, тогда как без азота покрытие самопроизвольно растрескивается при достижении критической толщины  $\sim 500$  нм. При этом установлен порог доли вводимого азота, ниже которого в покрытии не образуются карбонитридные фазы, поскольку их появление нарушает структурные принципы категории DLC-покрытий, уменьшает долю алмазной электронной конфигурации  $sp^3$  и ухудшает комплекс свойств покрытия. Результаты второго направления исследований представлены в виде многочисленных экспериментальных зависимостей физико-механических свойств покрытий (модуля упругости  $E$ , твердости  $H$ , сопротивления упругой  $H/E$  и пластической  $H^2/E^3$  деформации) от вариативных параметров технологии ( $\%N$ ,  $\lambda$ ,  $P$ ,  $t$ ). Третий раздел главы посвящен анализу сформированной базы экспериментальных данных и, в частности, полученных зависимостей с применением алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей. В качестве результатов этого анализа в диссертации представлены данные оптимизации режимов ионно-плазменного синтеза покрытий DLC (значения параметров  $\%N$ ,  $\lambda$ ,  $P$ ,  $t$ ), прогнозирующих комплекс максимальных значений их физико-механических свойств ( $E$ ,  $H$ ,  $H/E$ ,  $H^2/E^3$ ).

**В четвертой главе** работы методы получения, отбора, систематизации и анализа экспериментальных данных, использованные в предыдущей главе для оптимизации физико-механических свойств покрытий DLC, применены к их трибологическим свойствам. Сформирована база данных; построены экспериментальные зависимости трибологических характеристик – коэффициента трения  $\mu$  и величины износа  $L$  (длина пути трения образца до разрушения покрытия при испытаниях на машине трения) – от вариативных технологических параметров  $\%N$ ,  $\lambda$ ,  $P$ ,  $t$ , а также в зависимости от нагрузки трения  $F$ , использованной при испытаниях; выполнен анализ полученных данных с использованием алгоритмов машинного обучения; получены интервалы значений параметров  $\%N$  и  $\lambda$  для обеспечения максимальных показателей трибологических свойств  $\mu$  и  $L$ ; проведена верификация модельных результатов на

основе экспериментальных данных. Важной составляющей частью четвертой главы является раздел, посвященный исследованию комбинированных двухслойных покрытий системы CrAlSiN/DLC с наружным антифрикционным углеродным слоем и внутренним износостойким нитридным слоем. Полученные в этом разделе диссертации результаты составили экспериментальную основу для прикладного использования результатов работы, которые приведены в пятой главе.

**Пятая глава** диссертации посвящена процессам синтеза и промышленной апробации комбинированных покрытий CrAlSiN/DLC в производственной практике. На основе выполненных в лаборатории экспериментов была разработана технологическая карта и нанесены покрытия на контактные поверхности опытного образца узла механизма управления стабилизатором вертолета. Ресурсные стендовые испытания узла были проведены на испытательном участке ПАО «Роствертол» и показали двухкратное повышение износостойкости опытного образца с комбинированным покрытием (Акт проведенных испытаний приложен к диссертации и размещен в приложении Д).

**В заключении** приведены основные результаты и выводы по диссертационной работе, даны перспективы дальнейших исследований.

**В приложениях** представлены в основном иллюстративные материалы: выборки из баз экспериментальных данных комбинированных покрытий CrAlSiN/DLC и покрытий DLC; графики полученных экспериментальных зависимостей (без статистической обработки) физико-механических и трибологических свойств от вариативных технологических параметров; полные результаты регрессионного анализа зависимостей коэффициента трения  $\mu$  в двухфакторном эксперименте  $\%N-\lambda$  при различных нагрузках трения  $F$ , а также Акт о проведении стендовых испытаний опытных образцов с комбинированными покрытиями.

#### **4. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность**

На основе анализа современного состояния научных исследований и технологических разработок в области получения углеродных алмазоподобных покрытий по вакуумной ионно-плазменной технологии и их использования для повышения работоспособности нагруженных узлов трения, автор обоснованно и корректно сформулировал цель и задачи исследований.

Исследования проводились с использованием современных методов и оборудования для анализа состава, структуры и свойств материалов. Диагностика состава покрытий выполнялась спектрометрическими рентгеновскими методами фотоэлектронного и энергодисперсионного анализа. Для исследования структуры покрытий и подложек использованы методы оптической и электронной микроскопии. Физико-механические свойства покрытий определялись по методикам непрерывного индентирования, а трибологические свойства – путем испытаний образцов и изделий на специализированных стендах и машинах трения. Методические подходы,

использованные в работе, с научной точки зрения являются корректными, соответствующими требованиям мирового уровня.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов базируется на фундаментальных положениях, сопоставленных с общепринятыми отраслевыми знаниями и данными, полученными другими авторами и исследовательскими группами. В работе использовалось современное оборудование и методы, аттестованные методики и поверенные средства измерений. Полученные экспериментальные данные подвергались статистической обработке с определением значений доверительного интервала и дисперсии для характеристики их достоверности. Сформулированные в ходе исследований положения и выявленные закономерности подтверждены экспериментами и стендовыми ресурсными испытаниями.

### **5. Научная новизна и практическая значимость результатов диссертации**

1. Применение азота при нанесении углеродных покрытий по вакуумной ионно-плазменной технологии вместо традиционно используемого водорода позволяет избежать самопроизвольного растрескивания покрытия при осаждении вплоть до толщины в несколько микрометров. Экспериментально показано, что при этом DLC-покрытие не теряет своей фазовой однородности и сохраняет высокий комплекс свойств, а опасность возгорания или взрыва, как при использовании водорода, полностью исключается.

2. На полученном экспериментальном материале алмазоподобных покрытий продемонстрировано, что применение современных методов машинного обучения и нейросетевых алгоритмов позволяет эффективно оптимизировать технологические режимы нанесения покрытий для обеспечения заданных физико-механических и трибологических свойств покрытий. Это открывает перспективу перехода ионно-плазменной технологии, известной своей мультипараметричностью и неустойчивостью плазменных процессов, на новую ступень цифрового управления с его внедрением в высокотехнологичные производства страны.

3. В практике научных исследований, доведенных до стадии стендовых производственных испытаний, впервые использовано комбинированное двухслойное ионно-плазменное покрытие CrAlSiN+DLC, эффективно совмещающее износостойкость и антифрикционные свойства. Результаты этого направления исследований позволили существенно увеличить ресурс работоспособности нагруженного узла трения в системе управления вертолетом.

**Практическая значимость** выполненной диссертационной работы заключается в том, что полученные результаты легли в основу конкретных практических рекомендаций, направленных на совершенствование режимов вакуумного ионно-плазменного осаждения углеродных покрытий с целью улучшения их трибологических характеристик – коэффициента трения и износостойкости, что автору удалось реализовать в процессе стендовых испытаний механизма управления стабилизатором вертолета МИ-35 в действующем производстве компании ПАО «Роствертол».

## **6. Замечания по диссертационной работе**

1. На графиках зависимости свойств покрытий от параметров ионно-плазменной технологии (см. рис. 3.7 и графики Приложения Б) приводится очень большой разброс экспериментальных данных, что вызывает вопросы к надежности и достоверности результатов. Следовало бы привести разброс данных после статистической обработки – с доверительными интервалами и с учетом квадратичных отклонений.

2. Из диссертации не ясно, почему для покрытий DLC использованы нейросетевые методы обработки данных, а для комбинированных покрытий – методы регрессионного анализа.

3. В данных сканирующей электронной микроскопии, представленных в диссертации (см. рис. 3.2 и 3.3), структура покрытий DLC является однородной. В то же время данные РФЭС-анализа (табл. 3.2) свидетельствуют о неоднородности покрытий на наноструктурном уровне. Для ясности в этом вопросе было бы полезно привести результаты дифрактометрического исследования покрытий.

4. В работе были использованы два вида подложек из стали 40ХН2МА с сорбитной и мартенситной структурой. Они имели существенно различные уровни механических свойств, приведенные в главе 2 диссертации (раздел 2.1, С. 53). Однако результаты сравнительного влияния подложек на механические или трибологические свойства исследованных покрытий нигде в диссертации не встречаются.

Высказанные замечания, однако, не снижают научной значимости работы, поскольку не затрагивают главных положений и выводов автора.

### **Общая оценка и соответствие представленной работы критериям, предъявляемым к диссертациям и паспорту специальности**

Оценивая диссертацию А.И. Воропаева в целом, следует отметить, что её результаты характеризуются актуальностью, достоверностью и научной новизной. Актуальность темы исследования обеспечивается потребностью в новых износостойких и антифрикционных материалах и покрытиях, обладающих более высоким комплексом функциональных свойств для использования как в сложно нагруженных узлах трения, так и узлах трения специального назначения. Актуальность работы подтверждается также её выполнением в рамках исследовательских программ Минобрнауки РФ (идентификатор проекта RFMEFI60718X0203РНФ) и Российского научного фонда (проект № 21-79-30007). Рассматриваемая работа содержит новые оригинальные результаты и научные положения, четко аргументированные в диссертации и выдвигаемые для защиты. Большинство результатов диссертации могут быть использованы на практике, без специальной адаптации для производственных условий. К таким результатам можно отнести рекомендации по выбору составов и архитектуры покрытий, а также данные по назначению оптимизированных автором режимов вакуумного ионно-плазменного напыления покрытий.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечена использованием передового современного исследовательского, технологического и испытательного оборудования.

Новизна и важность сформулированных в диссертации положений свидетельствует о высокой научной квалификации автора.

Диссертация выполнена на широком библиографическом материале. Авторские выводы основаны на результатах собственных экспериментальных исследований. Работа имеет корректный, лаконичный, профессиональный стиль изложения, оформлена в соответствии с требованиями. Материал диссертации представлен в строгой научной последовательности: автор располагает наиболее важные резюмирующие выводы в конце каждой главы, определяя тем самым предпосылки исследований следующей главы. Это обеспечивает логическое построение работы, выделяет взаимосвязи между главами диссертации и подчеркивает завершенность каждой главы.

Соответствие тематики работы, областей исследования и полученных результатов паспорту научной специальности 2.5.3 «Трение и износ в машинах» определяется по следующим направлениям: 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 автора и автореферат полностью отражают содержание диссертации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 18 печатных работах, в том числе 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, и 5 – в международных базах цитирования Web of Science и Scopus, а также получен 1 патент РФ. Среди опубликованных работ соискателя имеются две авторские монопубликации. Результаты исследований апробированы на нескольких международных и всероссийских конференциях в период с 2019 по 2024 г.г., их список представлен в диссертации и автореферате. Имеются ссылки на авторов и источники заимствования материалов.

### **Заключение**

Диссертация Александра Ивановича Воропаева «Исследование и разработка технологических принципов повышения функциональных характеристик трибосопряжений при использовании DLC-покрытий, стабилизированных азотом» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные решения, имеющие существенное значение для развития страны, и заключающиеся в повышении работоспособности узлов трения широкого диапазона применений за счет использования ионно-плазменных алмазоподобных покрытий, триботехнические характеристики которых улучшены путем стабилизации азотом и оптимизации технологических параметров нанесения.

Считаю, что диссертационная работа Воропаева Александра Ивановича полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (пп.9–14), утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от

01.10.2018), а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах.

Даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

кандидат технических наук, (спец. 02.05.04 – Трение и износ в машинах), доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты»

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Фоминов Евгений Валерьевич

«11» ноября 2024 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Донской государственный технический университет» (ФГБОУ ВО ДГТУ)

Почтовый адрес организации: 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Тел.: 8(863)2738561; e-mail: [fominoff83@mail.ru](mailto:fominoff83@mail.ru)

Подпись Фомина Е.В. заверяю:

Ученый секретарь ученого совета

«11» ноября 2024 г.



В.Н. Анисимов