

## Отзыв

официального оппонента доктора технических наук, профессора  
**Панина Сергея Викторовича**  
на диссертацию **Воропаева Александра Ивановича**  
«Исследование и разработка технологических принципов повышения функциональных характеристик трибосопряжений при использовании DLC-покрытий, стабилизированных азотом»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах

Представленная на отзыв диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 139 наименований. Общий объем работы составляет 160 страниц и включает 37 рисунков, 4 таблицы и шесть приложений и акт использования результатов диссертационной работы.

### 1. Актуальность диссертационной работы

Долговечность, надежность и эффективность современных машин и механизмов, включая и все виды транспорта, во многом определяется выходом из строя узлов трения. В этой связи выбранный диссертантом в качестве объекта исследования - трибосопряжение вертолета МИ-35, как элемент механизма управления стабилизатором «червяк-барабан», является обоснованным. В настоящее время крайне актуальным направлением исследований является повышение износостойкости таких ответственных узлов трения путем создания на поверхностях трения структур, обладающих высокой износостойкостью, путем формирования вакуумных ионно-плазменных покрытий (ВИП), и в том числе разработка концепции формирования алмазоподобных покрытий (DLC). Следует подтвердить утверждение диссертанта о том, что формирование заданного уровня физико-механических и трибологических характеристик стальных поверхностей трения путем получения устойчивых значений толщины алмазоподобных покрытий позволяет получить принципиально новую и отличную от исходной поверхностную структуру трибосистемы.

Выбранное диссертантом направление, а именно определение оптимального технического решения с использованием азота для стабилизации углеродных покрытий вместо взрывоопасного водорода, с целью получения устойчивых значений толщины DLC-покрытий является востребованным и актуальным направлением научного поиска.

Об актуальности таких исследований свидетельствует их поддержка грантами Российского научного фонда, Министерства науки и высшего образования РФ.

### 2. Степень обоснованности целей, задач и достоверности выводов и рекомендаций диссертации

Приведенные в диссертации выводы и рекомендации, являющиеся итогом проведенных исследований, основаны на умелом и корректном использовании математических методов планирования эксперимента и статистической обработки результатов. Полученные результаты и их обобщение позволили сформировать базу данных DLC-покрытий, включающую параметры технологии нанесения, параметры подложки, характеристики архитектуры и структуры покрытий, их физико-механические и трибологические свойства.

Полученные автором результаты комплексных исследований тонкой структуры поверхностных слоев металлического трибосопряжения, их физико-механических и трибологических свойств позволили установить, что для достижения высокой износостойкости при использовании DLC-покрытий в тяжелонагруженных узлах трения необходимо реализовывать их комбинированное строение – двухслойную систему, сочетающую наружный углеродный слой (DLC) с низким коэффициентом трения и износостойкий (переходный) внутренний нитридный слой.

Обоснованность основных научных положений и выводов подтверждается данными, полученными с использованием методов математической статистики, результатами многофакторного планирования экспериментов и применением современных алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей.

Дополнительным подтверждением обоснованности рекомендаций и выводов, сделанных по итогам исследований, являются сравнительные стендовые испытания, выполненные с использованием разработок автора и рекомендованные к внедрению компании ПАО «Роствертол». Разработан подход применения технологических принципов использования вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий на основе DLC, стабилизированных азотом, для повышения износостойкости и надежности механизма управления стабилизатором вертолета МИ-35.

Кроме того, основные положения диссертационной работы прошли апробацию на международных научно-практических конференциях и опубликованы в 18 печатных работах, из них 6 – в рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 5 – в изданиях, включенных в международные базы данных, получен 1 патент РФ.

Опубликованные работы достаточно полно отражают содержание представленной диссертации. Имеются ссылки на авторов и источники заимствования.

### **3. Научная новизна результатов работы**

Научная новизна заключается в том, что автором продемонстрирована возможность управление процессом формирования вакуумных ионно-плазменных покрытий с прогнозируемым комплексом характеристик. К наиболее значимым научным результатам относятся следующие:

1. Доказано, что подача в камеру азота в объеме ( $\%N = 5...8$ ), как технологический параметр при нанесении углеродных покрытий, позволяет заменить взрывоопасный водород, обеспечить структурную однородность покрытия и стабилизировать толщину DLC-покрытий на уровне  $1,0...1,5$  мкм при одновременном повышении физико-механических и трибологических характеристик покрытия.

2. Путем применения многофакторного планирования эксперимента, а также машинного обучения и нейросетевых технологий определены оптимальные значения технологических параметров, которые обеспечивают максимальные значения физико-механических свойств DLC-покрытий.

3. Получены и оптимизированы для использования в нагруженных узлах трения комбинированные ионно-плазменные покрытия двухслойной морфологии «CrAlSiN+DLC», обеспечивающие повышение износостойкости за счет нитридного слоя и повышением антифрикционных характеристик за счет углеродного слоя.

#### **4. Значение полученных результатов, выводов и рекомендаций для науки и производства**

Выполненные в диссертации теоретические и экспериментальные исследования с использованием математических методов планирования эксперимента и статистической обработки результатов позволили не только сформировать базу данных DLC-покрытий, включающую параметры технологии нанесения, параметры подложки, а также архитектуры и структуры покрытий, их физико-механические и трибологические свойства, но и впервые апробировать перспективные цифровые аналитические инструменты в виде нейросетевых алгоритмов и преодолеть характерные проблемы вакуумной ионно-плазменной технологии, связанные с нестабильностью структуры и свойств, а именно:

- для оптимизации комплекса физико-механических свойств системы «подложка – подслоя – покрытие» рекомендовано использовать соотношение значений сопротивления пластической  $H^3/E^2$  деформации компонентов системы (где  $H$  – твердость,  $E$  – модуль упругости);

- сформулированы и предложены научно-методические принципы оптимизации технологических режимов формирования системы «подложка – подслоя – покрытие», в качестве основы которых использована методика ортогонального центрального композиционного плана (ОЦКП);

- 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.

На основе выполненных исследований автором убедительно показана перспектива дальнейших исследований (стр. 132-134 текста диссертации и стр. 19-20 автореферата):

1. Использование в ионно-плазменной установке нескольких катодов в сочетании с лазерным испарением графита позволяет формировать износостойкие легированные композиционные покрытия разных по составу и архитектуре для ответственных трибосопряжений для приложений в авиационной технике.

2. Проведение испытаний образцов с ионно-плазменными покрытиями, нанесенными на подложку из высококачественной конструкционной стали, в широком диапазоне отрицательных и положительных температур открывает перспективу применения этого метода в широкий класс узлов трения машин и механизмов в различных климатических зонах.

#### **5. Структура диссертации, ее единство и полнота публикаций**

Диссертация А.И. Воропаева охватывает основные вопросы, поставленные в целях и задачах решаемой проблемы и соответствует критерию внутреннего единства.

**Первая глава** посвящена анализу современного состояния методов получения углеродных покрытий, особенностей их формирования и их использования для повышения трибологических характеристик тяжело нагруженных трибосистем. При этом, диссертант отмечает работы современных ученых в этой сфере - как отечественных, так и зарубежных. На основании результатов анализа литературы формулируются основные направления исследований по диссертационной работе.

Во второй главе автором приведено описание методического обеспечения для проведения комплекса экспериментальных исследований на макро-, мезо- и наноуровне с использованием современной сертифицированной инструментальной и приборной базы, а также определены режимы нанесения углеродных и комбинированных покрытий.

Третья глава посвящена выявлению и исследованию корреляционных связей физико-механических характеристик ионно-плазменных углеродных покрытий и технологических параметров их осаждения, а также анализу возможностей их прогнозирования и оптимизации.

В четвертой главе приводятся результаты трибологических исследований в условиях трения скольжения с целью установления взаимосвязи технологических параметров формирования  $\%N$  и  $\lambda$  с трибологическими характеристиками в виде коэффициента трения и износостойкости для покрытий на основе углерода (DLC), а также комбинированных покрытий (CrAlSiN+DLC).

В пятой главе описаны закономерности формирования высокопрочных и антифрикционных поверхностных слоев при нанесении алмазоподобных DLC-покрытий и комбинированных покрытий системы «CrAlSiN+DLC». Показана перспективность их промышленного использования для увеличения ресурса эксплуатации особо ответственных и тяжело нагруженных узлов трения на примере механизма управления стабилизатором вертолета МИ-35.

Диссертация представлена в традиционном виде и изложена на 160 страницах и включает введение, 5 глав, заключение, список литературы из 139 наименований и приложения. Диссертация представляет законченный, логически связанный научный труд. Автореферат в полном объеме отражает основное содержание текста диссертации.

#### **6. Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах по следующим пунктам паспорта специальности:

- 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».

#### **7. Замечания по диссертации**

1. На стр. 11 текста диссертации указано, что одной из решаемых задач является «исследование стабилизации растворенными атомами азота толщины DLC-покрытий». К сожалению, несмотря на все достигнутые высокие механические и трибологические свойства разработанных покрытий, в работе не нашло отражение описание возможного механизма влияния азота на управление их толщиной в процессе осаждения.

2. На приведенных на рис. 3 на стр. 13 автореферата экспериментальных зависимостях изменения твердости  $H$  покрытий DLC от параметров нанесения – количества азота в

камере %N и тока катушек не указаны разбросы значений, несмотря на то, что в тексте диссертации (рис. 3.7, стр. 92) они приведены и характеризуются заметным разбросом. Автор обсуждает причины подобной нестабильности механических характеристик, однако, по мнению оппонента, было целесообразно было проранжировать технологические параметры по степени их влияния на выявленную нестабильность физико-механических свойств. Данное замечание справедливо и для рис. 4, стр. 15 автореферата (рис. 4.3 на стр. 113 текста диссертации).

3. На стр. 80 текста диссертации указано: «Электронно-микроскопическое исследование показывает высокую плотность прилегания покрытия к подложке. Граница между ними не обнаруживает какой-либо дефектности или следов деформации, что качественно может характеризоваться как удовлетворительная адгезия. При форсированных режимах нанесения в подслое наблюдалась пористость (рисунок 3.2, д, е), особенно значительная в зоне, прилегающей к подложке. Однако, судя по полученным микроснимкам, наличие пористости в подслое не сказывалось на плотности прилегания и морфологии границ “подслой – подложка” и “подслой – покрытие”». Было бы целесообразно инструментально количественно оценить величину адгезии, для чего существуют соответствующие приборные решения.

4. На стр. 103 текста диссертации автор сообщает: «После удаления одиннадцати экспериментов с наибольшей ошибкой качество предсказания значительно повысилось, достигнув  $R^2 = 0,45$ ». Если эксперимент был ошибочный, его вовсе не стоило принимать в рассмотрение. Видимо речь идет о максимальных отклонениях от средних значений, вызванных разнонаправленным влиянием различных технологических факторов и не всегда высокой степенью воспроизводимости результатов.

5. На рис. 4.7 текста диссертации, стр. 123, приведены РЭМ-микрофотографии структуры комбинированных покрытий CrAlSiN+DLC. Видно, что на поверхности присутствует заметное количество структурных элементов, сформированных в результате кристаллизации капельной фракции. Разумеется, о чем также пишет и автор диссертационной работы, данные элементы оказывают существенное влияние как на трибологические (поверхностные) свойства, так и их разброс. Было бы целесообразно дать количественную характеристику таких структур, например, путем измерения шероховатости. Это бы позволило достоверно объяснить существенную дисперсию результатов характеристики свойств разрабатываемых покрытий.

6. На стр. 145 текста диссертации автор указывает, что «область оптимальных значений варьируемых технологических параметров составляет %N = 5...8 %;  $\lambda = 3,0...3,8$  А». В то же время на той же странице сообщается, 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». По параметру  $\lambda$  первая и вторая рекомендации не пересекаются, поэтому не совсем очевидно, какое значение нужно рекомендовать для прикладного использования в нагруженных трибосистемах?

Приведенные замечания носят, скорее, частный характер и не влияют на суть основных выводов и защищаемых положений диссертационного исследования, которое является завершенной научной работой.

## **8. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней»**

Представленная Воропаевым А.И. диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержатся новые научные результаты и технологические решения в области поиска и оптимизации режимов осаждения вакуумных ионно-плазменных алмазоподобных покрытий, стабилизированных азотом, использование которых вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса в транспортном комплексе Российской Федерации.

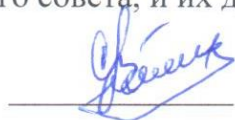
Работа автор выполнена самостоятельно на достаточно высоком уровне, о чем говорит большое количество публикаций (18 печатных работ, из них 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 5 – входящих в международные базы цитирования, получен 1 патент РФ) и выступлений на Российских и международных конференциях.

Задачи, цели и анализ содержания диссертации и публикации по ее теме позволяют сделать вывод, что диссертация Воропаева Александра Ивановича по актуальности избранной темы, характеру рассматриваемых вопросов, достигнутых результатов решения поставленных задач, степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверности и новизне, значению для теории и практики соответствует критериям пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности, а ее автор – Воропаев Александр Иванович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах.

### **Официальный оппонент:**

заведующий лабораторией механики полимерных композиционных материалов ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН», профессор, профессор РАН  
доктор технических наук  
(спец. 01.02.04 Механика деформируемого твердого тела)

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



Панин Сергей Викторович  
«15» 11 2024 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН»  
634055, г. Томск, Академический пр., 2/4  
Тел. Моб.: +79039532940  
E-mail: svp@ispms.ru



подпись С.В. Панина заверяю,  
ученый секретарь ИФПМ СО РАН, к.ф.-.м.н



Н.Ю. Матолыгина