

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

(РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина)

119991, г. Москва, Ленинский просп., д. 65, корп. 1, телефон: (499) 507-88-88 (многоканальный)
ОКПО 02066612; ОГРН 1027739073845; ИНН/КПП 7736093127/773601001
E-mail: com@gubkin.ru; <http://www.gubkin.ru>



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

К.Т.Н., доцент

Севастьянов **П. К. Калашников**

«19» ноября 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

1. Общая характеристика работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 139 наименований и шести приложений. Общий объем диссертации – 160 страниц, 37 рисунков и 4 таблицы.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация и автореферат соответствуют областям исследования паспорта научной специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах.

2. Актуальность темы исследования

Основной целью диссертационной работы Воропаева А.И. является повышение долговечности и работоспособности комбинированных вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхностях тяжело-нагруженных узлов трения. Существующий в настоящее время набор традиционных и современных технологий позволяет получать поверхностные слои с измененной структурой и

составом толщиной от нескольких миллиметров для наплаваемых покрытий до нескольких микрометров и менее для вакуумных, ионно-плазменных и газофазных покрытий. Толщины покрытий и слоев, получаемых всеми видами существующих в технике поверхностных обработок, охватывают пять порядков значений.

Выбор путей, обеспечивающих высокие эксплуатационные параметры тяжело-нагруженных трибосистем, повышение их физико-механических и трибологических параметров, ставит перед исследователями целый комплекс нерешенных задач. В рассматриваемой работе задача повышения работоспособности решается путем формирования вакуумных ионно-плазменных покрытий (ВИП), и в том числе разработки концепции нанесения алмазоподобных покрытий (DLC) и отработки их технологического режима.

Предлагаемый в работе подход представляется весьма актуальным как с точки зрения исследований по определению оптимальной технологии для стабилизации углеродных покрытий с целью получения устойчивых значений толщины DLC, так и с точки зрения прогнозирования физико-механических и трибологических характеристик DLC-покрытий в функциональной зависимости от технологических параметров нанесения и структурных характеристик покрытия.

Таким образом, тема диссертации является весьма актуальной, обусловленной важной технической задачей - определением критериев повышения износостойкости трибосистем и прогнозируемое управление процессом получения вакуумных ионно-плазменных покрытий.

3. Анализ содержания диссертации

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи работы, положения, выносимые на защиту. Отмечены научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы.

В первой главе представлен анализ современного состояния методов получения углеродных покрытий и их использования для повышения работоспособности нагруженных трибосопряжений.

Во второй главе обсуждается методическое обеспечение исследований, в том числе оборудование и режимы нанесения углеродных и комбинированных покрытий, методы аттестации состава и структуры покрытий, методики определения физико-механических и трибологических характеристик покрытий, а также методы статистической обработки данных, формирования и использования базы полученных экспериментальных данных.

Третья глава посвящена исследованию корреляционных связей физико-механических характеристик ионно-плазменных углеродных покрытий и технологических режимов нанесения: анализу возможностей их прогнозирования и оптимизации. Отмечено, что азот, использованный в качестве стабилизатора структуры углеродных покрытий вместо водорода, обеспечивает получение устойчивых значений толщины покрытий DLC вплоть до 1,5...2,0 мкм. Использованный методический подход позволил автору утверждать, что технология вакуумного ионно-плазменного напыления углеродных покрытий DLC может быть надежно управляемым процессом.

В четвёртой главе изложена разработка технологических принципов управления трибологическими свойствами углеродных покрытий на основе экспериментальных зависимостей и алгоритмов машинного обучения. Использование современных алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей позволило надежно определить интервалы оптимальных значений технологических параметров DLC-покрытий, а для выявления зависимостей коэффициента трения комбинированных покрытий CrAlSiN+DLC от технологических параметров был использован метод регрессионного анализа.

Пятая глава диссертации посвящена применению разработанной технологии ионно-плазменных углеродных покрытий на основе DLC, стабилизированных азотом, в трибосопряжениях механизма управления стабилизатором вертолета МИ-35. Результаты сравнительных производственных испытаний трибосопряжений с комбинированным покрытием системы CrAlSiN+DLC и антифрикционным покрытием на основе ВАП-3 показали перспективность промышленного внедрения технологии применения ВИП-покрытий на основе DLC, стабилизированных азотом.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации, даны перспективы дальнейших исследований.

4. Новизна научных результатов

Из значимых научных результатов следует выделить:

1. Показано, что использование азота вместо взрывоопасного водорода при нанесении углеродных покрытий позволяет обеспечить структурную однородность покрытия, а также получение устойчивых значений толщины DLC-покрытий.

2. Исследование комплекса вариативных технологических параметров нанесения покрытий DLC (величина подачи азота в камеру %N, ток λ индукционных катушек, давление в рабочей камере P и время нанесения t) показало, что наиболее эффективные значения физико-механических характеристик DLC-покрытий формируются путем варьирования основных технологических параметров – величины азота и тока индукционных катушек λ .

3. Установленные закономерности формирования градиентного распределения электронных конфигураций углерода sp^3 и sp^2 по толщине DLC-покрытия позволяют обеспечить возможность управлять не только износостойкостью, но и коэффициентом трения.

4. Использование современных цифровых инструментов анализа экспериментальных данных дает возможность оптимизировать параметры нанесения покрытий и надежно прогнозировать их трибологические свойства.

5. Предложенные в работе комбинированные ионно-плазменные покрытия двухслойной морфологии CrAlSiN+DLC обеспечивают повышение износостойкости за счет нитридного слоя и повышение антифрикционных характеристик за счет углеродного слоя.

В приложениях представлена обширная выборка из базы данных экспериментов по нанесению DLC-покрытий содержащая значения вариативных технологических параметров, физико-механических и трибологических характеристик, а также экспериментальные зависимости физико-механических и трибологических свойств DLC-покрытий от вариативных технологических параметров нанесения покрытий.

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития машиностроительной отрасли заключается в получении автором теоретических и экспериментальных результатов исследования, которые позволят качественно расширить процессы управления в области получения вакуумных ионно-плазменных покрытий на поверхностях тяжело-нагруженных узлов трения.

5. Теоретическая значимость результатов работы заключается в:

– развитии технологии нанесения вакуумных ионно-плазменных и углеродных покрытий, что позволило повысить безопасность технологического процесса;

- апробации нейросетевых алгоритмов в применении ионно-плазменной технологии нанесения покрытий в целях определения стабилизации по однородности с ростом толщины покрытий;
- применении комбинированных DLC-покрытий, состоящих из наружного углеродного слоя (DLC) с низким коэффициентом трения и износостойкого внутреннего нитридного слоя для обеспечения высокой износостойкости тяжело-нагруженных узлов трения.

6. Практическая значимость результатов работы заключается:

- в проведении поиска наилучшего решения по формированию технологических режимов формирования вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий различной архитектуры в зависимости от трибологических условий эксплуатации;
- в проведении апробации применения технологических принципов использования вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий на основе DLC, стабилизированных азотом, для повышения износостойкости и надёжности механизма управления стабилизатором вертолётa МИ-35.

7. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

В диссертационной работе разработаны модели и предложены алгоритмические методы и технологические решения, направленные на доказательство эффективности метода нанесения комбинированных вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий, позволяющие существенно повысить срок службы тяжело-нагруженных узлов трения.

Оценивая диссертацию Воропаева А. И. следует отметить, что важность проведенных автором исследований связана с необходимостью внедрения в сферу производства машиностроения новых и безопасных технологий, на основе комбинированных ионно-плазменных углеродных покрытий. Разработанная технология может быть применена для отраслей экономики Российской Федерации, которые используют в своем производстве ответственные тяжело-нагруженные узлы трения.

Критический анализ рецензируемой диссертации как квалификационной работы показывает, что в ней успешно решены поставленные задачи.

Научные результаты работы могут быть рекомендованы для передачи в ведущие научно-исследовательские организации РФ, занимающиеся проблемами поверхностного упрочнения: ИПМех РАН, ВНИИ НП, Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина.

8. Замечания по диссертационной работе:

1. В работе отмечено, что важной характеристикой DLC-покрытий является адгезионная прочность их сцепления с подложкой, однако вопрос инструментального определения этой характеристики в работе не обсуждается.

2. При формировании аморфных покрытий решающее значение имеет скорость охлаждения, формируемая при осаждении материала на подложку, однако при изучении влияния технологических параметров этот показатель не рассматривался. В связи с этим не ясно, могут ли зависимости влияния технологических параметров на свойства покрытия, полученные в разделе 3.2 для подложки из стали 40ХН2МА, применяться для сталей и сплавов другого химического состава и теплофизических свойств.

3. При анализе зависимости длины пути L , пройденного образцом до разрушения DLC-покрытий от тока индукционных катушек λ автором получены экспериментальные зависимости $\ln L = f(\lambda)$ для различных значений F в виде полиномов третьего и четвертого порядков. После чего автор утверждает «В совокупности полученные зависимости (4.3)–(4.5) позволили построить топологическую поверхность длины пробега образцов $\ln L$ (длины дорожки трения до разрушения покрытия) на плоскости параметров F – λ , т. е. график функции $\ln L = f(F, \lambda)$, который приведен на рисунке 4.2.». Каким образом автор произвел построение указанной поверхности в работе не указано.

4. Отношение H/E – автор называет «сопротивлением упругой деформации» а H^3/E^2 – «сопротивлением пластической деформации». В работе Д.В. Штанского и др. (Штанский Д.В и др. Адгезионные, фрикционные и деформационные характеристики покрытий Ti–(Ca,Zr)–(C,N,O,P) для ортопедических и зубных имплантантов //Физика твердого тела, 2006, Т.48, вып. 7, С.1231-1238) отношение твердости к модулю Юнга называется «индексом пластичности», а в работе С.И. Булычева и Алехина В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. М.: Машиностроение, 1990, -224 с. это отношение характеризует упруго-пластичные свойства материала. В работе Т.У. Tsui и др. (Tsui T.Y., Pharr G.M., Oliver W.C., Bhatia C.S., White R.L., Anders S., Anders A. and Brown I.G. Nanoindentation and nanoscratching of hard carbon coatings for magnetic disks //

Mater. Res. Soc. Symp. Proc. – 1995. – Vol. 383. P. 447–452) отношение H^3/E^2 названо «качественной сравнительной характеристикой сопротивления пластической деформации». Автору рецензируемой работы следует более тщательно относиться к используемой терминологии.

Следует отметить, что приведенные замечания касаются, в первую очередь, полноты изложения, не ставят под сомнение справедливость полученных результатов и выводов, не снижают научную ценность и не изменяют общую положительную оценку диссертационной работы.

9. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации

В соответствии с п. 9 диссертация Воропаева Александра Ивановича «Исследование и разработка технологических принципов повышения функциональных характеристик трибосопряжений при использовании DLC-покрытий, стабилизированных азотом» законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые научно обоснованные технические решения и разработки в области технологии машиностроения, имеющие существенное значение для развития отечественного машиностроительного производства.

В соответствии с п. 10 диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. Диссертация содержит сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов. Предложенные автором диссертации решения аргументированы, в диссертации содержатся сравнительные оценки этих решений с другими известными решениями.

В соответствии с пп. 11 и 13 основные научные результаты исследований опубликованы в 18 трудах, из них 6 – в статьях из Перечня научных рецензируемых изданий ВАК, 5 статей входят в перечень, индексируемый Scopus и Web of Science, получен патент РФ на изобретение. Количество публикаций, в которых излагаются основные научные результаты диссертации, соответствует требованиям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В соответствии с п. 14 диссертационная работа содержит ссылки на источники заимствования материалов и на работы других авторов.

Таким образом, диссертация по своему теоретическому уровню и практическому значению соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации, а ее автор Воропаев Александр Иванович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах.

Диссертация, автореферат и отзыв были рассмотрены, обсуждены и одобрены на заседании кафедры трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина» (Протокол № 11-24 от «11» ноября 2024 года).

Заведующий кафедрой трибологии и технологий
ремонта нефтегазового оборудования
ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»
доктор технических наук,
профессор

Елагина Оксана Юрьевна
12.11.2024 г.

Профессор кафедры трибологии и технологий
ремонта нефтегазового оборудования
ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»,
доктор технических наук,
профессор

Малышев Владимир Николаевич
12.11.2024 г.

Ученый секретарь,
кандидат технических наук,
доцент

Вышегородцева Галина Ирековна
12.11.2024 г.

