

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

44.2.005.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (РОСЖЕЛДОР), по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук аттестационное дело № \_\_\_\_\_ решение диссертационного совета от 23.12.2024 №10

О присуждении Воропаеву Александру Ивановичу, Российская Федерация, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Исследование и разработка технологических принципов повышения функциональных характеристик трибосопряжений при использовании DLC-покрытий, стабилизированных азотом» по специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах принята к защите 11.10.2024 г. протокол заседания №8 диссертационным советом 44.2.005.01, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения», РОСЖЕЛДОР, 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, город Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2., Приказ Минобрнауки РФ № 561/нк от 03.06.2021, далее – ФГБОУ ВО РГУПС.

Соискатель Воропаев Александр Иванович, 17 апреля 1971 года рождения, в 2006 г. окончил государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» с присуждением квалификации инженер по специальности «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование». Обучался с 2008 по 2012 г. в очной аспирантуре ФГБОУ ВО РГУПС по научной специальности 05.02.04 «Трение и износ в машинах». Работает в должности научного сотрудника научно-исследовательской части кафедры «Теоретическая механика» ФГБОУ ВО РГУПС (РОСЖЕЛДОР).

Диссертация выполнена на кафедре «Теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», РОСЖЕЛДОР.

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 лабораторией 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) – дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени

И.М. Губкина», г. Москва – в своем положительном заключении, подписанном Елагиной Оксаной Юрьевной, д.т.н., профессором, заведующей кафедрой трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования, профессором кафедры трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования, д.т.н. Малышевым Владимиром Николаевичем и ученым секретарем к.т.н., доцентом Вышегородцевой Галиной Ирековной и утвержденном проректором ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» по научной работе к.т.н., доцентом П.К. Калашниковым, указала, что диссертация Воропаева А.И. «Исследование и разработка технологических принципов повышения функциональных характеристик трибосопряжений при использовании DLC-покрытий, стабилизированных азотом» является законченной научно-квалификационной работой, содержит новые научно обоснованные технические решения и разработки в области технологии машиностроения, имеющие существенное значение для развития отечественного машиностроительного производства. Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку. Диссертация содержит сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов. Предложенные автором решения аргументированы, в диссертации содержатся сравнительные оценки этих решений с другими известными решениями. 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.

Соискатель имеет 43 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации – 18 работ, из них в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ – 6, в изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science – 5. Объем опубликованных работ по теме диссертации составляет 8,16 п.л. Авторский вклад – 4,26 п.л. Все публикации достаточно полно отражают основные результаты исследований поиска наилучшего решения по формированию технологических режимов вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий на основе DLC, стабилизированных азотом, различной архитектуры в зависимости от трибологических условий эксплуатации. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. **Воропаев А.И.** 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. **Воропаев А.И.** 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.
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. Zabayaka, 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 9th 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. **Voropaev A. I.** 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.

### На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

– **ведущей организации** – ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (НИУ). Отзыв положительный. Замечания: **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 40XH2MA, 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  $\lambda$  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  $F$ – $\lambda$ , 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  $H3/E2$  – «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  $H3/E2$  названо «качественной сравнительной характеристикой сопротивления пластической деформации». Автору рецензируемой работы следует более тщательно относиться к используемой терминологии.

– **официального оппонента** – д.т.н., профессора, заведующего лабораторией механики полимерных композиционных материалов ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН» **Панина Сергея Владимировича**. Отзыв положительный. Замечания: **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 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 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 диссертации автор указывает, что «область оптимальных значений варьируемых технологических параметров составляет  $\%N = 5...8 \%$ ;  $\lambda = 3,0...3,8 \text{ А}$ ». 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  $\lambda = 2,0 \pm 0,2 \text{ А}$ , 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?

– **официального оппонента** – к.т.н., доцента кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» **Фомина Евгения Валерьевича**. Отзыв положительный. Замечания: **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.

**На автореферат поступило 11 отзывов. Все отзывы положительные.**

**1. Отзыв** к.т.н., доцента кафедры «Высокоэффективные технологии обработки» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» **Федорова Сергея Вальдемаровича.** Замечания: **1.** Как известно, легирование N, хотя и несколько уменьшает долю  $sp^3$  в алмазоподобном покрытии, ограничивает образование связей, содержащих O, что, в свою очередь, препятствует графитизации при нагреве в зоне трибоконтакта. Не является ли именно механизм определяющим с точки зрения уменьшения износа доминирующим. **2.** Из автореферата не ясно, в каких парах трения указанное покрытие целесообразно использовать по мнению автора и на сколько результаты исследования процесса трения в паре сталь-твердый сплав можно распространить на другие пары трения. **3.** Из автореферата не ясно, при какой температуре проходил технологический процесс и как она влияла на свойства полученного комбинированного покрытия. **4.** Из графика рис. 3б не следует, что значение тока катушек соленоидов в диапазоне 3-3.8 А являются оптимальными. Не ясно, какую напряженность магнитного поля соленоиды обеспечивают. На мой взгляд, было бы более понятным оперировать значение напряженности магнитного поля, а не величиной тока в некоем технологическом устройстве.

**2. Отзыв** д.ф.-м.н., профессора, главного научного сотрудника Института математики, механики и компьютерных наук им. Воровича И.И. ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» **Чебакова Михаила Ивановича.** Замечания: **1.** При трибологических испытаниях в качестве контртела на стр. 10 указано, что использовался шарик из металлокерамики (WC-Co) без указания таких его характеристик как: геометрический размер, шероховатость поверхности и его твердость. **2.** Из текста автореферата не ясно, при каких нагрузочных-скоростных режимах проводились трибологические испытания.

**3. Отзыв** д.т.н., профессора кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственной технической университет» **Бутенко Виктора Ивановича.** Замечания: **1.** В автореферате отсутствуют данные о влиянии давления в рабочей камере и времени нанесения покрытия на физико-механические характеристики покрытия. **2.** Из автореферата не ясно, при каких режимах и как осуществлялось проведение стендовых испытаний ионно-плазменных покрытий для оценки их износостойкости и надежности узлов трения.

**4. Отзыв** начальника НТЦ научно-производственного центра ФАУ «ЦАГИ», профессора МФТИ, д.т.н. **Вермеля Владимира Дмитриевича**. Замечания отсутствуют.

**5. Отзыв** д.т.н., профессора, генерального директора АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО ВНИКТИ) **Коссова Валерия Семеновича**. Замечания: **1.** Из автореферата не ясно, каким классом шероховатости должны обладать образцы-подложки, на которую наносится алмазоподобное ионно-плазменное покрытие? **2.** Из рисунка 4а не ясно, при каких нагрузках происходит уменьшение коэффициента трения при увеличении процентного содержания азота? **3.** Известно, что температура является важным параметром, определяющим трибологические характеристики узлов трения. Однако в автореферате не отмечено – при какой температуре проводились трибологические испытания. **4.** Учитывая, что большинство узлов трения транспорта, машин и механизмов работает в условиях динамических нагрузок, желательно иметь результаты их устойчивой работы и сохранения трибологических характеристик в данных условиях.

**6. Отзыв** д.т.н., профессора, научного консультанта научного центра «Аспирантура» АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО ВНИИЖТ) **Захарова Сергея Михайловича**. Замечания: **1.** Осталось неясным, как толщина составляющих слоев, предложенных автором комбинированных покрытий, влияет на триботехнические характеристики модифицированной поверхности трибосопряжений. **2.** Были ли исследованы триботехнические характеристики предложенных перспективных покрытий в условиях динамических режимов нагружения?

**7. Отзыв** секции научно-технического совета (НТС) АО Научно-Производственной Корпорации «Конструкторское Бюро Машиностроения» НПК «КБМ» под руководством председателя НТС академика РАН, генерального конструктора д.т.н. **Кашина Валерия Михайловича** и членов НТС начальника технологического отдела **Костарева Владимира Анатольевича**, начальника отдела материаловедения и покрытий **Пивачева Владимира Владимировича**, ученого секретаря к.в.н. **Котова Юрия Петровича**. Замечание: **1.** Из содержания автореферата не ясна зависимость долей фаз  $sp^2$  и  $sp^3$  от величины подачи азота в камеру установки.

**8. Отзыв** д.т.н., профессора, чл.-корр. РАН, генерального конструктора АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан - Баррикады» **Шурыгина Виктора Александровича** и д.т.н., заместителя генерального директора-технический директор АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан - Баррикады» **Ингеманссона Александра Рональдовича**. Замечания: **1.** В работе автор рассмотрел влияние технологических режимов нанесения комбинированных вакуумно-плазменных покрытий на повышение износостойкости узлов деталей машин, работающих в условиях внешнего трения с широким диапазоном нагрузок. Следует отметить, что значительный научный и практический интерес представляет также изучение влияния вакуумно-плазменных покрытий на повышение работоспособности металлорежущих инструментов, эксплуатируемых при режимах резания, когда по площадке контакта имеет место не только внешнее трение, но и адгезионная связь, влияющая на характер контактного взаимодействия и изнашивания. **2.** Соискатель, оценивая перспективы дальнейших исследований,

обращает внимание на важную научно-практическую проблему определения и управления теплопроводностью многослойных вакуумно-плазменных покрытий. Автору следует обратить внимание и на другой параметр, определяющий функциональное свойство покрытия, – температуропроводность, представляющую собой меру тепловой инерции.

**9. Отзыв** д.т.н., профессора, академика НАН Беларуси, заведующего отделом «Трение, смазка и эксплуатационная стойкость материалов» Института механики металло-полимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси **Мышкина Николая Константиновича** и к.т.н., заведующего сектором «Специальные смазочные материалы» Института механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси **Гуцева Дмитрия Михайловича**. Замечание: **1.** Отмечено недостаточно высокое качество иллюстрационного материала, в частности, представленные рисунки 1 и 5, на которых имеются нечитаемые надписи.

**10. Отзыв** д.т.н., профессор кафедры «Автомобили и транспортно-технологические комплексы» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова» ЮРГПУ (НПИ) **Шульги Геннадия Ивановича**. Замечание: **1.** В качестве материала образцов подложки для нанесения покрытий диссертантом выбрана конструкционная легированная сталь 40ХН2МА, содержащая хром, никель, молибден и другие элементы. Легирующие элементы хром и никель образуют на поверхности стали комплексную пассивирующую оксидную пленку, снижающую адгезию покрытий, наносимых ионно-плазменным напылением. Для повышения адгезии покрытия и улучшения триботехнических свойств диссертантом предложено наносить на поверхность выбранный легированной стали подслоу титана с покрытием DLC и хрома с комбинированным покрытием CrAlSiN+DLC. В автореферате следовало бы привести методику определения адгезии, а также величину адгезии предлагаемых покрытий с подслоем титана и хрома к подложке.

**11. Отзыв** д.ф.-м.н., профессора, директора Института проблем машиностроения РАН – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапанова-Грехова Российской академии наук» **Ерофеева Владимира Ивановича**. Замечания отсутствуют.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их значительным опытом в научно-исследовательской работе и подготовке научных кадров в области трения, изнашивания и упрочнения узлов трения машин и механизмов, а также в области машиноведения, систем приводов и деталей машин и широким кругом публикаций в ведущих специализированных изданиях.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

– **разработаны** и апробированы технологические принципы формирования алмазоподобных (DLC) и комбинированных покрытий системы CrAlSiN+DLC стабилизированных азотом на поверхности трибосистем с использованием методов моделирования и планирования экспериментов;

– **предложен** способ повышения износостойкости DLC-покрытий на основе стабилизации их толщины атомами азота;

– **получены** зависимости между технологическими параметрами нанесения вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий и их физико-механическими и трибологическими свойствами во взаимосвязи с соотношением величин гибридизации углерода  $sp^3/sp^2$ ;

– **сформулированы** научно-методические принципы увеличения ресурса ответственных трибосопряжений путем формирования на их контактных поверхностях износостойких вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий заданной микроструктуры и обладающих физико-механическими и трибологическими свойствами, адаптированными к условиям эксплуатации.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

– **доказано** на основе адекватной интерполяционной математической модели повышение износостойкости узлов трения путем оптимизации технологии нанесения вакуумных ионно-плазменных DLC-покрытий, стабилизированных азотом;

– **применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы** перспективные цифровые аналитические инструменты в виде алгоритмов машинного обучения, позволившие преодолеть проблемы обработки больших массивов экспериментальных данных и неустойчивости макрохарактеристик синтезируемых вакуумных ионно-плазменных покрытий, и как результат, сформирована база данных DLC-покрытий, включающая параметры технологии нанесения, параметры подложки, характеристики структуры покрытий, их физико-механические и трибологические свойства;

– **изложен** принцип повышения износостойкости при использовании DLC-покрытий в тяжело-нагруженных узлах трения с использованием комбинированных покрытий – двухслойной системы, сочетающей наружный углеродный слой (DLC) с низким коэффициентом трения и износостойкий внутренний нитридный слой: такое теоретическое положение реализовано в работе путем формирования трибосистемы «сталь 40XH2MA – подслой Cr – комбинированное покрытие CrAlSiN+DLC», где подслоя Cr использован для лучшей адгезии нитридного компонента покрытия;

– **раскрыты** способы направленного конструирования микроструктуры слоистых вакуумных ионно-плазменных покрытий, определяющие их физико-механические и трибологические свойства;

– **изучены** механизмы влияния комбинированных покрытий, в частности, систем TiAlN/DLC и CrAlSiN/DLC на трибологические характеристики трибосистемы – коэффициент трения и износостойкость;

– **приведено** теоретическое и экспериментальное обоснование целесообразности использования азота для стабилизации толщины ионно-плазменных покрытий DLC.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

– **разработаны** и практически реализованы методы увеличения ресурса трибосопряжений ответственных узлов трения путем формирования вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий различной микроструктуры, адаптированных к условиям эксплуатации; для повышения износостойкости и надежности механизма управления стабилизатором вертолета МИ-35, на основе результатов проведенных исследований, предложена техническая и нормативная

документация по использованию вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий на основе DLC, стабилизированных азотом;

– **определены** перспективы дальнейшего расширения практического применения и совершенствования разработанных слоистых углеродных ионно-плазменных покрытий семейства DLC;

– **созданы** технологические рекомендации по материалам и режимам формирования покрытий в производственных условиях, осуществлена их заводская стендовая проверка в условиях компании ПАО «Роствертол»;

– **представлены** результаты сравнительных производственных испытаний трибосопряжений с предлагаемым комбинированным покрытием системы CrAlSiN+DLC и используемым антифрикционным покрытием, показавшие перспективность промышленного внедрения инновационной технологии применения ионно-плазменных покрытий на основе DLC, стабилизированных азотом.

#### **Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

– для экспериментальных работ и 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 трибосопряжений: непрерывное индентирование – для исследования механических свойств твердых тел с использованием измерительной платформы NanoTest 600, рентгеновская фотоэлектронная и оже-электронная спектроскопия, оптическая микроскопия высокого разрешения для определения морфологии, микрорельефа и анализа поверхности трения, вакуумная установка BRV600 с модулями магнитного сепаратора и присоединенного углеродного блока для нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий, электронная микроскопия (в том числе двулучевой электронный/ионный микроскоп ZEISS CrossBeam 340) для исследования тонкого строения покрытий и зон трения, микрорентгеноспектральный энергодисперсионный анализ для высокоточного локального определения элементного состава, установки TRB и ИИ5018 для проведения испытаний на трение и износ, заводской стенд для испытаний механизма управления стабилизатором вертолета МИ-35;

– **теория** построена на использовании современных представлений об электронном строении материи, базовых положениях физико-химической совместимости материалов, и согласуется с экспериментальными данными и аналогами, опубликованными по теме диссертации;

– **идея базируется** на обобщении опыта и расширении области его применения достижений отечественных и зарубежных ученых по решению широкого спектра трибологических задач в металлических трибосопряжениях, а также на возможностях современных средств экспериментальных исследований;

– **использованы** апробированные и разработанные методики проведения исследований на современном экспериментальном оборудовании, а также применены специальные промышленные испытательные стенды, участвующие в заводских приемочных испытаниях;

– **установлено** качественное и количественное совпадение полученных автором результатов с известными теоретическими и экспериментальными

данными, что подтверждает адекватность разработанных расчетных методик и алгоритмов;

– **использованы** современные аналитические методы сбора и обработки исходной информации для прогнозирования параметров трения и изнашивания при проведении экспериментальных исследований.

**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».

**В ходе защиты были высказаны следующие критические замечания,** связанные с адгезионной прочностью сцепления покрытия с подложкой, геометрическими характеристиками покрытий, влиянием кристаллизации капельной фракции на трибологические характеристики вакуумных ионно-плазменных покрытий.

**Соискатель Воропаев А.И. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:** при трении износ покрытий DLC происходит по механизму истирания, а это значит, что адгезия у покрытия выше, чем прочность, которая, как более слабое звено, и определяет стойкость к износу. Поэтому с точки зрения трибологии имеет смысл исследовать влияние параметров на прочность, а не на адгезию.

Диссертационная работа нацелена на изучение влияния технологических параметров на трибологические характеристики покрытий. Одним из таких параметров является содержание азота в рабочей камере. В работе установлено, что толщина покрытия стабилизируется при значении этого параметра 5 – 8%.

Технологические параметры более значимы для формирования покрытий, чем капельные дефекты. Тем более, что капельная фаза может регулироваться вплоть до полного устранения путем сепарации, предусмотренной в конструкции вакуумной установки BRV600. Поэтому технологические параметры и вынесены в тему диссертации, а капельную фазу мы старались при экспериментах убирать.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленных научных задач, обладает внутренним единством, что подтверждается корректной постановкой цели и задач исследований; содержит новые научные результаты, а также свидетельства личного вклада автора в науку. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На заседании «23» декабря 2024 года диссертационный совет принял решение за разработку и практическую реализацию научно-методических принципов 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 путем использования DLC-покрытий, стабилизированных азотом, внедрение которых вносит существенный вклад в развитие триботехники, что соответствует критериям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 02.08.2016) «О порядке присуждения ученых степеней» к кандидатским диссертациям, и принял решение присудить Воропаеву Александру Ивановичу ученую степень кандидата технических наук по специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 8 докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 15, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета  
44.2.005.01 академик РАН,  
д-р техн. наук, профессор



Колесников Владимир Иванович

Ученый секретарь  
диссертационного совета 44.2.005.01  
д-р техн. наук, профессор

Щербак Петр Николаевич

23.12.2024 г.