

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.098.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ  
МЕХАНИКИ ИМЕНИ А.Ю. ИШЛИНСКОГО РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ  
БУКОВСКОГО ПАВЛА ОЛЕГОВИЧА  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело N \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета  
от 26 октября 2023 года, протокол № 6

О присуждении Буковскому Павлу Олеговичу,  
гражданину Российской Федерации ученой  
степени кандидата физико-математических  
наук.

Диссертация «Теоретико-экспериментальное изучение фрикционных характеристик углерод-углеродных композитных материалов» по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела принята к защите 22 июня 2023 года, протокол № 4 диссертационным советом 24.1.098.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (119526, Москва, проспект Вернадского, д. 101, к. 1, приказ о создании диссертационного совета № 225/нк от 14.02.2023)

Соискатель Буковский Павел Олегович, 14 ноября 1993 года рождения, В 2017 г. окончил Институт высоких технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технологический университет» по специальности 09.04.01 - «Информатика и вычислительная техника». Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2023 году Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук. В период подготовки диссертации Буковский П.О. работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН) в лаборатории трибологии в должности младшего научного сотрудника.

Диссертация выполнена в лаборатории трибологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем

механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук.

**Научный руководитель** – доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН Горячева Ирина Георгиевна. Работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук в должности главного научного сотрудника.

#### **Официальные оппоненты:**

**Степашкин Андрей Александрович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории ускоренных частиц «ЛУЧ», доцент кафедры Физической Химии (ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»).

**Беляк Ольга Александровна**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика» (ФГАОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»), отсутствует по уважительной причине;

дали положительные отзывы на диссертацию.

#### **Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной механики Российской академии наук. В своем положительном заключении, подписанном директором Института прикладной механики РАН, д.т.н. Власовым А.Н. и ведущим научным сотрудником Института прикладной механики РАН, к.ф.-м.н. Волковым-Богородским Д.Б., указала, что диссертационная работа Буковского П.О. посвящена развитию теоретико-экспериментальных подходов изучения трибологических характеристик углерод-углеродных композитных материалов. Так как композитные материалы фрикционного назначения представляют большой интерес для отечественной авиационной промышленности возникает острая необходимость расширения класса таких материалов на основе широкого спектра экспериментальных и теоретических исследований.

Соискатель имеет 14 опубликованных работ, из них по теме диссертации опубликовано 14 научных работ, изданных в периодических научных изданиях, сборниках материалов и тезисах докладов международных и всероссийских конференций, в том числе 4 статьи в научных журналах и



изданиях, которые включены в перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Буковский П.О., Морозов А.В., Кириченко А.Н. Влияние приработки на коэффициент трения углеродных композитных материалов авиационных тормозов // Трение и износ. – 2020. – Т. 41, № 4. – С. 448–456.
2. Буковский П.О., Горячева И.Г. Теоретико-экспериментальное исследование контактно-усталостного разрушения углеродуглеродных композитов // Трение и износ. – 2021. – Т. 42, № 5. – С. 539–551.
3. Морозов А.В., Буковский П.О., Голубков А.К. Влияние температуры и нагрузки на коэффициент трения между углеродными волокнами // Изв. РАН. МТТ. – 2022. № 3. – С. 32-39.
4. Буковский П.О., Морозов А.В., Кулаков В.В., Голубков А.К., Родионов Н.Б., Кириченко А.Н. Триботехнические свойства углерод-углеродных фрикционных композитов при высоких температурах // Трение и износ. – 2022. Т. 43, №5. – С. 491-501.

Все эксперименты в работах [1-4] были проведены автором самостоятельно. В работах [1,3,4] постановка задач исследований проводилась совместно с А.В. Морозовым, но проведение экспериментов, обработка и анализ их результатов осуществлялись лично автором. В работе [2] автором разработан алгоритм решения контактной задачи в условиях трения скольжения стального шарика по углеродному композиту, математическая постановка которой была предложена научным руководителем Горячевой И.Г. Все необходимые расчеты были проведены автором самостоятельно, полученные результаты обсуждались совместно с Горячевой И.Г. Для работы [3] совместно с А.В. Морозовым был изготовлен держатель углеродных волокон для проведения экспериментов на микротрибометре УМТ-3МТ (СЕТР, США). Совместно с А.В. Морозовым была произведена модернизация лабораторного трибометра УМТ-2 (СЕТР, США) для работы [4] с целью проведения высокотемпературных испытаний в бескислородной среде. В работах [1,4] проведение Раман спектроскопии на образцах УУКМ было осуществлено А.Н. Кириченко («ИТЭР-Центр»).

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от:

- д.т.н., директора Института прикладной механики РАН Власова А.Н. и к.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника Института прикладной механики РАН Волкова-Богородского Д.Б., которые наряду с



положительным отзывом сделали следующие замечания: 1) В то время как экспериментальная часть работы изложена подробно и обоснованно, теоретическая модель, направленная на оценку поврежденности композита и определение глубины зарождения контактно-усталостного разрушения, изложена очень лаконично. Это касается всех составляющих раздела 4.3, начиная с критерия разрушения, а также оценки параметров модели поврежденности. В итоге автор несколько нивелировал результаты разработанного им подхода оценки предельных характеристик усталости, хотя идея использования локализации зон усталостного разрушения на основе напряжении, полученных из решения контактной задачи, оказалась интересной, адекватной и плодотворной. 2) В выводах главы 2 даны только качественные формулировки, без подтверждения их количественными результатами (например, «повышение температуры приводит к уменьшению коэффициента трения», глава 2 стр. 68, и далее аналогично). 3) В выводах главы 4 также следовало бы дать количественные оценки точности разработанного теоретико-экспериментального метода оценки характеристик контактно-усталостного разрушения композитов. 4) На стр. 17 говорится о высокой степени анизотропии исследуемых композитов, хотя в дальнейшем (см. стр. 98) упоминается, что «упругие характеристики структурных элементов незначительно отличаются друг от друга». 5) На стр. 29 утверждается, что решается проблема «зарождения контактно-усталостной трещины» - это, по крайней мере, не совсем точно, ибо в работе нет модели зарождения дефектов, и вообще, говорить о трещине в рассматриваемых композитах не вполне корректно, ибо для волокнистых композитов существует много сценариев накопления повреждений, приводящих в результате к макро-разрушению. 6) В разделе 4 не расшифровываются некоторые параметры ( $a_1$  и далее). В силу чрезвычайной лаконичности изложения не понятно, как получены характеристики разрушения (глубина) и т.д. 7) На рис. 3.3 (стр. 74) не обозначены кривые 1, 2, 3, указанные в подрисуночной подписи. 8) На стр. 99 нет объяснения, что такое приведенный модуль упругости  $E^*$  в теории Герца и для чего он нужен, в дальнейшем он нигде не используется.

- Д.ф.-м.н., доцента, профессора кафедры «Теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» Беляк О.А., которая наряду с положительным отзывом сделала следующие замечания: 1. Исследуемые материалы, хаотично армированные дискретными волокнами, в главе 4 были описаны однородной изотропной



средой, с эффективным модулем упругости, определенным по правилу смесей. Проводились ли сопоставления полученных теоретических значений осредненных модулей упругости для рассматриваемых композитов с экспериментальными данными или полученными другими методами вычисления эффективных механических свойств структурно-неоднородных сред? 2. Теоретические методы исследования контактно-усталостного разрушения в работе выполнены для хаотично армированных УУКМ, описываемых эквивалентной изотропной однородной средой. Применимы ли разработанные теоретические методы для анизотропных сред? 3. Интересно было бы рассмотреть, как типы упругой симметрии материалов влияют на глубину зарождения контактно-усталостного разрушения в нем при циклическом режиме нагружения.

- к.т.н., старшего научного сотрудника лаборатории ускоренных частиц НИТУ МИСИС Степашкина А.А., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. Введение не в полной мере отражает прогресс в развитии характеристик углеродных волокон, в таблице 1 приведены характеристики волокон 1 - 2 поколений, в то время как использованные в работе волокна Zoltek, относятся к 3 - 4 поколениям и существенно превосходят рассмотренные в таблице 1 по своим прочностным характеристикам; 2. Во введении нет анализа и приближенной оценки напряженно-деформированного и теплового состояния, возникающего в материале тормоза при выполнении самолетом торможения в различных режимах, что необходимо для обоснования применяемых автором схем и режимов испытаний УУКМ, выбранных в работе; 3. Во введении есть ряд неточностей в описании технологий получения УУКМ, к примеру: «Процесс газофазного осаждения является весьма длительным и требующим создания сложного оборудования. Для достижения предельной (максимально возможной) плотности (как правило, немного большей 1,7 г/см<sup>3</sup>) требуется уплотнение в течение нескольких месяцев», в то время как процессы газофазного уплотнения позволяют получать плотности до 2,0-2,1 г/см<sup>3</sup> за существенно более короткие циклы уплотнения; 4. К недостатку я могу отнести «кодирование» наименований УУКМ в работе, так как название «УУКМ 1» мало что скажет заинтересованному читателю, в то время как «ТЕРМАР-АДФ-\*\*\*» или «ТЕРМАР-ДФ-\*\*\*» хорошо известны и исследователям, и среди представителей промышленности, что существенно повысило бы интерес к работе и полученным в ней результатам; 5. Кодирование наименований материалов исследования, применяемое в работе, не является постоянным, к примеру «УУКМ 3» из



глав 1 и 4 и «УУКМ 3» рассматриваемый в главе 3, - это разные материалы, что затрудняет восприятие представленных результатов; 6. В таблице 1.1 приведены характеристики исследуемых в первой главе материалов, однако не указан источник этих данных, аналогичное замечание можно сделать по таблице 2.1 в главе 2; 7. К недостаткам можно отнести то, что не проведено определение фактических характеристик использованных образцов и их сравнение с табличными, например, по критерию плотности, что не требует больших трудозатрат, но позволяет ранжировать приготовленные образцы на однородные группы; 8. Во введении рассмотрено влияние угла выхода на поверхность углеродного волокна на трибологические свойства УУКМ, в то время как в тексте диссертации не приведена информация по таким углам для исследованных материалов; 9. В работе не хватает информации по характеристикам использованных автором углеродных волокон (количество филаментов, линейная плотность, технологические покрытия, и т.д.); 10. Не приведены литературные источники, из которых взяты Рамановские спектры углеродных волокон и материалов матрицы, используемые для идентификации продуктов износа на дорожках трения. Выводы о составе продуктов износа по результатам Рамановской спектроскопии (рисунок 3.7) являются не совсем корректными, так как спектры карбонизованной при температуре 2000 °С пековой матрицы и углеродных волокон близки, и различить по ним волокно и матрицу не представляется возможным. На ширину пиков существенное влияние оказывает размеры частиц, от которых получается спектр и наличие в этих частицах дефектов, возникающих в результате механического воздействия. Из приведенных на рисунке данных можно только предполагать более высокую температуру финальной термообработки «УУКМ4». Поэтому для подтверждения выводов о преимущественном формировании дорожек из продуктов износа волокна или матрицы не хватает данных оптической или сканирующей электронной микроскопии, выполненных после соответствующих испытаний на поверхностях трения, и микроскопии самих продуктов износа.

- Д.т.н., профессора кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО Тверской государственный технический университет Измайлова В.В., который наряду с положительным отзывом сделал следующее замечание: К недостаткам автореферата следует отнести неудачную форму представления зависимостей коэффициента трения и интенсивности изнашивания от номинального контактного давления и скорости скольжения (рис. 10 и 11 автореферата). Из этих рисунков трудно



представить себе характер этих зависимостей и степень влияния определяющих факторов, тем более в черно-белом варианте печати автореферата.

- Д.ф.-м.н., профессора кафедры Теории пластичности механико-математического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Федулова Б.Н., который наряду с положительным отзывом сделал следующее замечание: Единственное замечание к плану работы, которое можно сделать это построение модели поврежденности сразу в условиях контакта при отсутствии таковой в более простых условиях, например, при одноосном напряженном состоянии. Возможно эти вопросы изложены в самой диссертационной работе.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием у официальных оппонентов и представителя ведущей организации публикаций по теме работы соискателя:**

1. Беляк О.А., Суворова Т.В. Влияние микроструктуры основания на силы трения при движении плоского штампа // Экол. вестн. научн. центров ЧЭС. – 2018, № 3. – С. 25 – 31.
2. Иваночкин П.Г., Суворова Т.В., Данильченко С.А., Новиков Е.С., Беляк О.А. Комплексное исследование полимерных композитов с матрицей на основе фенилона С-2 // Вестник РГУПС. – 2018. – Т.72, № 4. – С. 18 – 25.
3. Беляк О.А., Суворова Т.В. Учет трения в области контакта при колебаниях жесткого штампа на поверхности полуограниченной среды // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2019. – Т.16, № 3. – С. 33 – 39.
4. Беляк О.А., Суворова Т.В. О влиянии взаимодействия фаз гетерогенного основания на контактные напряжения при колебаниях штампа с трением // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2020. – Т. 17, № 3. – С. 29 – 36
5. Колесников В.И., Беляк О.А., Колесников И.В., Суворова Т.В. О математической модели для прогнозирования трибологических свойств маслonaполненных композитов при вибрации // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки – 2020. – Т. 491. – С. 44 – 47.
6. Kolesnikov V.I., Suvorova T.V., Belyak O.A. Modeling antifriction properties of composite based on dynamic contact problem for a heterogeneous foundation // Materials Physics and Mechanics. – 2020. – №4. – P. 17 – 27.
7. Суворова Т.В., Беляк О.А. Контактные задачи для пористоупругого композита при наличии сил трения // Прикладная математика и механика. – 2020. – Т. 84, №4. – С. 529 – 539.



8. Belyak O.A., Suvorova T.V. Predicting of the mechanical properties of antifriction composite materials // *Mechanics of Composite Materials*. -2021. - Vol. 57, № 5. - С. 647 – 656
9. Беляк О.А., Суворова Т.В. Колебания штампа на поверхности гетерогенного слоя при учете трения в области контакта // *Прикладная математика и механика*. – 2021. – Т. 85, № 3. – С. 321 – 331.
10. Колесников В.И., Беляк О.А. Математические модели и экспериментальные исследования - основа конструирования гетерогенных антифрикционных материалов. - М: Физматлит, 2021. -216 с.
11. Pashkov D.M., Belyak O.A., Guda A.A., Kolesnikov V.I. Reverse Engineering of Mechanical and Tribological Properties of Coatings: Results of Machine Learning Algorithms// *Physical Mesomechanics*. -2022. - V. 25 (4). - P. 296-305.
12. V.I. Kolesnikov, D.M. Pashkov, O.A. Belyak, et al. Design of double layer protective coatings: Finite element modeling and machine learning approximations // *Acta Astronautica* (2023). V. 204. P. 869- 877.
13. Stepashkin A.A., Chukov D.I., Senatov F.S., Salimon A.I., Korsunsky A.M., Kaloshkin S.D. 3D-printed PEEK-carbon fiber (CF) composites: Structure and thermal properties // *Composites Science and Technology*. 2018. Vol. 164. P. 319-326. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.05.032
14. Stepashkin A.A., Chukov D.I., Zadorozhnyy M.Y., Kaloshkin S.D., Pyatov I.S., Deniev M.Y. Thermal properties of carbonized composite materials based on carbon filled elastomeric matrices // *International Journal of Materials Research*. 2018. Vol. 109. No. 8. P. 771-778. DOI: 10.3139/146.111656
15. Stepashkin A.A., Ozherelkov D.Y., Sazonov Y.B., Komissarov A.A. Criteria for Evaluating the Fracture Toughness of Carbon–Carbon Composite Materials // *Metal Science and Heat Treatment*. 2018. Vol. 60. No. 3-4. P. 266-272. DOI: 10.1007/s11041-018-0271-9
16. Chukov D., Nematulloev S., Torokhov V., Stepashkin A., Sherif G., Tcherdyntsev V. Effect of carbon fiber surface modification on their interfacial interaction with polysulfone // *Results in Physics*. 2019. Vol. 15. P. 102634. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102634
17. Stepashkin A.A., Ozherelkov D.Y., Sazonov Y.B., Komissarov A.A., Mozalev V.V. Change in Interlayer Strength and Fracture Toughness of Carbon-Carbon Composite Material under the Impact of Cyclic Loads // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019. Vol. 10. No. 1. P. 155-161. DOI: 10.1134/S2075113319010301
18. Stepashkin A.A., Ozherelkov D.Y., Sazonov Y.B., Komissarov A.A. Fracture toughness evolution of a carbon/carbon composite after low-cycle fatigue //



Engineering Fracture Mechanics. 2019. Vol. 206. P. 442-451. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.12.018

19. Olifirov L.K., Stepashkin A.A., Sherif G., Tcherdyntsev V.V. Tribological, mechanical and thermal properties of fluorinated ethylene propylene filled with al-cu-cr quasicrystals, polytetrafluoroethylene, synthetic graphite and carbon black // Polymers. 2021. Vol. 13. No. 5. P. 781. DOI: 10.3390/polym13050781

20. Statnik E.S., Ignatyev S.D., Stepashkin A.A., Salimon A.I., Chukov D., Kaloshkin S.D., Korsunsky A.M. The analysis of micro-scale deformation and fracture of carbonized elastomer-based composites by in situ SEM // Molecules. 2021. Vol. 26. No. 3. P. 587. DOI: 10.3390/molecules26030587

21. Mohammad H., Stepashkin A.A., Laptev A.I., Tcherdyntsev V.V. Mechanical and Conductive Behavior of Graphite Filled Polysulfone-Based Composites // Applied Sciences (Switzerland). 2023. Vol. 13. No. 1. P. 542. DOI: 10.3390/app13010542

22. Stepashkin A.A., Mohammad H., Makarova E.D., Odintsova Y.V., Laptev A.I., Tcherdyntsev V.V. Deformation Behavior of Single Carbon Fibers Impregnated with Polysulfone by Polymer Solution Method // Polymers. 2023. Vol. 15. No. 3. P. 570. DOI: 10.3390/polym15030570

23. Лурье С.А., Рабинский Л.Н., Кривень Г.И., Лыкосова Е.Д. Напряженное состояние в элементах структуры модифицированных волокнистых композиционных материалов с вискеризованными волокнами // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. 2018. Т. 24. № 1. С. 122-144

24. Solyaev Y., Lurie S. Numerical predictions for the effective size-dependent properties of piezoelectric composites with spherical inclusions // Composite Structures. 2018. Vol. 202. P. 1099-1108

25. Lurie S., Solyaev Y., Volkov A., Volkov-Bogorodskiy D. Bending problems in the theory of elastic materials with voids and surface effects // Mathematics and Mechanics of Solids. 2018. Vol. 23. No. 5. P. 787-804

26. Гавва Л.М., Лурье С.А. Метод расчета напряженно-деформированного состояния конструктивно-анизотропных панелей из композиционных материалов с учетом технологии изготовления и граничных условий общего вида // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2018. № 7. С. 14-23

27. Лурье С. А., Волков-Богородский Д. Б. Тензор Грина и решение задачи Буссинеска в обобщенной теории упругости // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2018. № 4. С. 100–114

28. Соляев Ю. О., Горбачев В. И. Сопоставление методов Мори-Танака и Горбачева-Победри в задаче определения эффективных свойств композитов с



пьезоактивными сферическими включениями // Механика композиционных материалов и конструкций. 2019. Т. 25. № 1. С. 57–75

29. Solyaev Y., Lurie S., Korolenko V. Three-phase model of particulate composites in second gradient elasticity // European Journal of Mechanics-A/Solids. 2019. Vol. 78. P. 103853

30. Lurie S. On the possible of the abnormally high damping effective properties of dispersion-reinforced composites and fibrous composites // Journal of Physics: Conference Series. 2020. No. 1. Vol. 1666

31. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Корнев Ю.В. Влияние углеродных добавок на механические характеристики эпоксидного связующего. // Известия российской академии наук. МТТ. 2020, № 3, с. 131-142.

32. Babaytsev A.V., Dobryanskiy V.N., Solyaev Y. Optimization of Thermal Protection Panels Subjected to Intense Heating and Mechanical Loading // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2020. Vol. 40. No. 7. P. 887-895

33. Kriven G.I., Lurie S., Thang T.Q., Orekhov A.A. Strength, stiffness, and damping properties of whiskerized fiber composites with longitudinal shear // Composites: Mechanics, Computations, Applications. 2021. Vol. 12. No. 4. P. 1-22

34. Vasiliev V., Lurie S., Solyaev Y. New approach to failure of pre-cracked brittle materials based on regularized solutions of strain gradient elasticity // Engineering Fracture Mechanics. 2021. Vol. 258. P. 108080

35. Козлов Г. В., Долбин И. В., Карнет Ю.Н., Власов А.Н. Сравнительный анализ эффективности армирования полимерных нанокомпозитов 2d-нанонаполнителями на примере полиимид/ $na^+$  - монтмориломит и поливиниловый спирт/оксид графена. // Механика композиционных материалов и конструкций. 2022, т. 28, №2, 247-254.

36. Vlasov A. N., Volkov-Bogorodsky D.B., Savatorova V.L. Using asymptotic homogenization in parametric space to determine effective thermo-viscoelastic properties of fibrous composites with interphase layer // Mathematics and Mechanics of Solids. - 2022. - С. 10812865221140526.

37. Vlasov A. N., Volkov-Bogorodsky D.B., Savatorova V.L. Calculation of the effective properties of thermoviscoelastic composites using asymptotic homogenization in parametric space // Mechanics of Time-Dependent Materials. – 2022. – V. 26. – №. 3. – С. 565-591

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

**предложен и апробирован теоретико-экспериментальный метод изучения процесса накопления контактно-усталостных повреждений в волокнистых углеродных композитах, основанный на расчете внутренних напряжений;**



спроектированы и созданы оснастки для жгутов углеродных волокон, а также камера для проведения экспериментальных исследований трибологических свойств углеродных композитов в бескислородной среде;

**разработана** экспериментальная методика определения коэффициента трения между жгутами углеродных волокон по схеме контакта перекрещивающихся цилиндров;

**разработана** методика, позволяющая определять трибологические характеристики углерод-углеродных композитных материалов при повышенных температурах в бескислородной среде;

на базе проведенных экспериментальных исследований **изучен** эффект влияния фрикционной пленки, образующейся на поверхности трения, на трибологические свойства в широком диапазоне изменения нагрузочно-скоростных параметров.

**Теоретическая значимость обоснована тем, что:**

**разработана** и экспериментально подтверждена расчетная модель контактно-усталостного разрушения волокнистых композитов в условиях циклического нагружения, основанная на построении и анализе функции поврежденности материала на макроуровне;

**разработаны** методики экспериментальных исследований фрикционных характеристик (коэффициента трения и интенсивности изнашивания) углерод-углеродных композитов и отдельно жгутов волокон в различных диапазонах нагрузочно-скоростных параметров.

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

**разработанная** методика определения характеристик функции поврежденности хаотично армированных углерод-углеродных композитов на макроуровне может быть использована для прогнозирования контактно-усталостного разрушения волокнистых композитов в условиях циклических нагружений;

**полученные** выражения для расчета количества циклов до разрушения исследованных в работе композитов могут быть использованы для прогнозирования их разрушения при других циклически меняющихся контактных нагрузках;

**полученные** экспериментальные значения трибологических характеристик (коэффициента трения и интенсивности изнашивания) исследованных композитов могут быть использованы для проектирования (усовершенствования) изготавливаемых из них авиационных тормозных дисков, что существенно сократит число предварительных тестов,



необходимых для оценки их фрикционных характеристик и долговечности по износу.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:**

**решение контактной задачи** построено с использованием известных положений теории упругости и механики разрушений, их достоверность также подтверждается удовлетворительным соответствием с экспериментальными данными;

**результаты экспериментальных исследований** получены на современном высокоточном лабораторном оборудовании, **показана** воспроизводимость результатов экспериментов при различных нагрузочно-скоростных параметрах; эксперименты проведены с должным количеством испытаний с использованием статистических методов оценки погрешности измерения.

**Личный вклад соискателя состоит в:**

самостоятельном проведении всех экспериментальных исследований; построении решения контактной задачи о циклическом фрикционном нагружении стальным шариком углеродного композита, математическая постановка которой была предложена научным руководителем; вклад автора в основные публикации по результатам исследования составляет приблизительно 60-70%.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания и заданы следующие вопросы: дать оценку применимости правила смесей, используемого для расчета эффективного модуля упругости; объяснить выбор поправочного коэффициента, входящего в правило смесей; обосновать выбор схем трения для экспериментальных исследований и их соответствие используемым на практике трибосопряжениям.

Соискатель Буковский П.О. ответил по существу на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, привел аргументацию по использованию правила смесей для расчета эффективных модулей упругости; ответил на вопрос о выборе поправочного коэффициента в правиле смесей; дал пояснение используемым схемам трения и обосновал их соответствие реальным узлам трения.

На заседании 26.10.2023 **Диссертационный совет принял решение:** за существенный вклад в разработку теоретико-экспериментального подхода к прогнозированию контактно-усталостного разрушения хаотично армированных углерод-углеродных композитных материалов и развитие экспериментальных методов исследования углерод-углеродных композитных



материалов в условиях трения скольжения одноименных пар трения, получение новых результатов, имеющих не только научное, но и практическое значение, присудить Буковскому Павлу Олеговичу учёную степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 23 человек, из них 6 докторов наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 22, против – нет, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель диссертационного совета  
24.1.098.01 при ИПМех РАН,  
академик РАН



Климов Д.М.

Ученый секретарь диссертационного совета  
24.1.098.01 при ИПМех РАН,  
к.ф.-м.н.

Сысоева Е.Я.

27 октября 2023 г.