

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Буковского Павла Олеговича

**«Теоретико-экспериментальное изучение**

**фрикционных характеристик углерод-углеродных композитных материалов»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

В настоящее время в технике все шире используются различные композиционные материалы, среди которых углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) – класс конструкционных материалов, предназначенных для создания теплонагруженных элементов конструкций, например, деталей планера воздушно-космических и гиперзвуковых самолетов, газотурбинных двигателей, деталей сопловых блоков ракет, тормозов самолетов. Несмотря на ряд научных и опытно-конструкторских работ, как в России, так и за рубежом, посвященных изучению и применению таких материалов в авиакосмической технике, существует ряд не исследованных и малоизученных задач, так, например, изучение трибологических процессов вышеназванных композитов в бескислородной среде для исключения влияния окисления и при учете высоких температур, обусловленных фрикционным разогревом, определение коэффициента трения между пучками углеродных волокон в зависимости от объемной температуры и контактной нагрузки, изучение процессов контактно-усталостного разрушения композитов в условиях их циклического нагружения. Этим важным задачам посвящена диссертационная работа Буковского П.О. Все вышесказанное определяет **актуальность и научно-практическую значимость** темы диссертационного исследования Буковского П.О., что также подтверждается и тем, что основные результаты диссертации были получены в рамках гранта РФФИ.

В диссертационной работе Буковского П.О. изучаются фрикционные характеристики УУКМ на основании комплексного подхода, который включает в себя экспериментальные исследования трибологических



характеристик (коэффициент трения, скорость изнашивания) УУКМ в условиях трения скольжения, изучение механизмов трения и изнашивания УУКМ при различных нагрузочно-скоростных параметрах взаимодействия, теоретические исследования контактно-усталостного разрушения подповерхностных слоев углеродных композитов в условиях циклически изменяющегося поля напряжений на основе решения пространственной контактной задачи.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых источников, списка рисунков и списка таблиц.

Во **введении** дан хорошо структурированный обзор основных работ по теме диссертации, изложены подходы и методы к изучению механических и прочностных характеристик УУКМ и его компонент. Определена цель и актуальность исследований, сформулированы новые результаты и положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлено экспериментальное исследование коэффициента трения по схеме «палец-диск» по результатам планирования факторного эксперимента с вариацией нормальных давлений и скоростей скольжения на двух уровнях для трех типов композитов (на основе графитированных волокон длиной 40 мм и 0,5 мм, и карбонизованных волокон длиной 40 мм). Изучено формирование третьего тела в условиях скольжения УУКМ по поверхности образца из того же материала методом Рамановской спектроскопии.

Во **второй главе** описаны экспериментальные исследования, проведенные в заданных диапазонах изменения нагрузки и температуры по схеме контакта «перекрещивающиеся цилиндры» с целью изучения коэффициента трения между жгутами углеродных волокон двух типов (графитированные и карбонизованные), которыми армированы рассматриваемы в работе УУКМ. Выполнен анализ экспериментальных данных, установлены закономерности изменения коэффициента трения для двух типов волокон от объемной температуры и нагрузки.

В **третьей главе** представлены исследования коэффициента трения, интенсивности изнашивания УУКМ четырех типов, в том числе, при высоких температурах, обусловленных фрикционным разогревом в бескислородной среде для исключения влияния окисления поверхности образцов. Трибологические испытания образцов проведены по схеме «кольцо-кольцо»



(полный контакт), в соответствии с методикой планирования факторного эксперимента с вариацией нормальных давлений и скоростей скольжения на двух уровнях. Изучен механизм формирования третьего тела, его структурное состояние в зависимости от нагрузочно-скоростных параметров взаимодействия и температуры в контакте на основе Рамановской спектроскопии.

**Четвертая глава** посвящена исследованию контактно-усталостного разрушения УУКМ на основе теоретических и экспериментальных подходов. Экспериментальные исследования контактно-усталостного разрушения подповерхностных слоев углеродных композитов трех типов (на основе дискретного графитированного волокна различной длины и карбонизованного волокна) проведены по схеме шарик-диск. Экспериментально установлены закономерности изменения коэффициента трения от приложенной нормальной нагрузки к индентору. Экспериментально установлен усталостный механизм разрушения исследуемых материалов, его связь с полем макронапряжений, возникающем в композите и обусловленным внешним действующим циклическим полем напряжений. Теоретические исследования проведены на основании решения пространственной контактной задачи о скольжении сферического упругого индентора по лицевой поверхности полупространства, механические характеристики которого определены с учетом его микроструктуры. Показана корреляция экспериментальных и теоретически полученных значений глубины залегания усталостной трещины.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующих результатах: исследованы фрикционные свойства УУКМ нескольких классов в зависимости от типа армирующих волокон, их длин и способа армирования, пучков углеродных волокон, в том числе в бескислородной среде, с учетом повышенных температур; впервые экспериментально измерен коэффициент трения при взаимодействии двух перекрещивающихся пучков углеродных волокон, установлены зависимости коэффициента трения от объемной температуры и контактной нагрузки; изучен механизм формирования третьего тела в процессе трения для рассматриваемых материалов при учете нагрузочно-скоростных параметров взаимодействия и



температуры в контакте, в том числе в бескислородной среде; аналитически получены выражения, определяющие глубину зарождения контактно-усталостной трещины для рассматриваемых в работе УУКМ.

**Практическая значимость** результатов диссертационного исследования состоит в их использовании при создании новых композиционных материалов с длительным эксплуатационным ресурсом, например, для изготовления авиационных тормозов, адаптированных к условиям циклического нагружения в широком диапазоне нагрузочно-скоростных параметров.

**Достоверность** полученных автором результатов обусловлена использованием современного высокоточного лабораторного оборудования при проведении экспериментальных исследований, применением известных апробированных статистических методов обработки экспериментальных данных, повторяемостью, воспроизводимостью результатов экспериментов (проверка однородности дисперсий повторов опытов выполнена на основе критерия Кохрена, проверка адекватности модели выполнена с помощью критерия Фишера); результаты, полученные на основании аналитического решения контактной задачи теории упругости, подтверждены путем сравнительного анализа с экспериментальными данными.

Полученные автором в ходе диссертационной работы результаты являются **оригинальными и обоснованными**, они полностью отражены в публикациях автора, апробированы на всероссийских и международных научных конференциях. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 14 печатных работах, из них 4 работы в изданиях, входящих в наукометрические базы Scopus и Web of Science, в периодических журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Наиболее **существенные научные результаты** диссертационной работы:

– на основании экспериментальных исследований установлены функциональные зависимости коэффициента трения, интенсивности изнашивания различных типов УУКМ от нагрузочно-скоростных параметров взаимодействия, в том числе при учете температуры в контакте; установлен механизм образования и структура фрикционной пленки для рассматриваемых типов УУКМ при разных нагрузочно-скоростных параметрах взаимодействия, в зависимости от температуры;



– на основании теоретико-экспериментального подхода получены аналитические зависимости для прогнозирования разрушения хаотично армированных УУКМ в условиях их циклического нагружения и предложен метод определения параметров функции поврежденности исследуемых материалов на макроуровне.

Замечаний по структуре и оформлению диссертации нет, отмечу четкое и последовательное изложение результатов диссертационного исследования. Автореферат диссертации правильно и полно отражает основное содержание работы. Однако имеются **замечания** по диссертационной работе Буковского П.О.:

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.

Приведенные замечания, не влияют на общую **положительную оценку** диссертационной работы Буковского П.О.

**Заключение.** Учитывая вышесказанное, считаю, что диссертационная работа Буковского Павла Олеговича на тему «Теоретико-экспериментальное изучение фрикционных характеристик углерод-углеродных композитных материалов» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную самостоятельно на высоком научном уровне с использованием современных методов исследований, в которой содержится

комплексное, на основании предложенных теоретико-экспериментальных методов, решение задачи, имеющее важное значение для развития соответствующей отрасли знания, содержит ряд новых интересных результатов, имеющих фундаментальное и практическое значение. Диссертационная работа Буковского Павла Олеговича соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Буковский Павел Олегович заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

« 28 » сентября 2023 г.

*Даю согласие на обработку своих персональных данных*

**официальный оппонент**

\_\_\_\_\_ Беляк Ольга Александровна  
доктор физико-математических наук  
(специальность 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела»),  
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»,  
профессор кафедры «Теоретическая механика», доцент,  
телефон: +8 863 2726349,  
e-mail: o\_bels@mail.ru,  
адрес: 344038, г. Ростов-на-Дону,  
пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 )

Подпись Беляк О. А.

УДОСТОВЕРЯЮ

Начальник управления делами  
ФГБОУ ВО РГУПС

« 28 » 09



Т.М. Канина