

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки  
**ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ**  
Российской академии наук



125040, Москва, Ленинградский пр-т, д.7, стр.1  
тел. (495)946-18-06, 946-18-03; факс: (495)946-18-03  
e-mail: [iam@iam.ras.ru](mailto:iam@iam.ras.ru)

**УТВЕРЖДАЮ**

Заместитель директора

Федерального государственного

бюджетного учреждения науки

Института прикладной механики

Российской академии наук

(ИИРИМ РАН)

к.ф.м.н.  С.И. Жаворонок

« 28 » сентября 2023 г.

" 28 " сентября 2023 г.

Исх. № 11509/5-155/1

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

«Института прикладной механики Российской академии наук»

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

На отзыв представлены: текст диссертационной работы на 134 стр., включая 28 иллюстраций и 16 таблиц, библиографический список из 181 наименования, автореферат на 36 стр., включая список из 14 публикаций по теме диссертации (4 статьи в рецензируемых журналах перечня ВАК РФ). Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников.

#### **Актуальность темы диссертационного исследования**

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.

Натурные стендовые эксперименты занимают длительное время и имеют высокую стоимость, поэтому актуальной задачей является проведение лабораторных испытаний на модельных образцах с целью выявления наилучших экземпляров для их дальнейшего подробного изучения. Лабораторные испытания более гибкие, что позволяет проводить эксперименты при различных схемах армирования, расположения структурных составляющих в матрице и так далее, что невозможно при натурном стендовом эксперименте. Совместное применение экспериментальных результатов и теоретического моделирования процессов, происходящих при фрикционном взаимодействии может дать не только возможность прогнозирования этих материалов на долговечность, но и сформулировать требования к свойствам внутренних составляющих и характеру их расположения в матрице, которые обеспечат большой ресурс работы. Такого рода исследования несомненно являются актуальными и представляют значительный интерес при разработке технологических приемов получения перспективных долговечных углерод-углеродных композитных материалов в том числе для авиационных тормозов. Поэтому диссертационная работа Буковского Павла Олеговича, посвященная развитию теоретико-экспериментальных методов изучения фрикционных характеристик углерод-углеродных композитных материалов является **актуальной**.

### **Структура и содержание работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объем работы составляет 134 страницы, включая 28 рисунков и 16 таблиц. Список литературы содержит 181 наименование.

Во **введении** приведен развернутый анализ современного состояния исследований по тематике диссертации, рассмотрены отечественные и зарубежные публикации. Уделяется большое внимание как экспериментальным, так и теоретическим исследованиям. Отмечена актуальность темы исследований, сформулированы цели и задачи диссертации, научная новизна и практическая значимость результатов работы, их достоверность и личный вклад автора. Также во



введении приведены положения, выносимые на защиту, и в кратком изложении описано содержание разделов диссертации.

**В первой главе** приведены результаты экспериментов по изучению влияния нормальной нагрузки и скорости скольжения на значения коэффициента трения и на формирование фрикционной пленки для трех различных углерод-углеродных композитных материалов. Исследовались отечественные углерод-углеродные композиты, отличающиеся своей внутренней структурой, т.е. длиной исходного сырья (волокон) и их термической обработкой (карбонизация и графитация). Экспериментальное исследование проведено согласно методике двухфакторного планированного эксперимента, использование которой позволяет достаточно просто и эффективно количественно оценить все линейные эффекты факторов и их взаимодействие. Исследование фрикционной пленки, формирующейся на дорожке трения, методом Рамановской спектроскопии позволило косвенно оценить ее принадлежность к одному из структурных элементов углеродного композита. Важными здесь являются полученные выводы, что сформированная пленка в основном состоит из частиц износа углеродных волокон, а также что использование углеродных волокон с низкой термообработкой (карбонизованные волокна) при армировании углеродной матрицы позволяет повысить коэффициент трения при фрикционном взаимодействии одноименной пары трения.

**Вторая глава** посвящена изучению коэффициента трения между отдельными жгутами углеродных волокон. Данная глава основывается на одном из выводов предыдущей главы и является ее логическим продолжением. Изучались карбонизованные и графитированные углеродные волокна отечественного и зарубежного производств. Для экспериментального исследования для микротрибометра был изготовлен специальный держатель для жгутов углеродных волокон. После трибологических испытаний проводилось исследование поверхности углеродных волокон методами сканирующей электронной и зондовой микроскопии. В результате проведенных испытаний установлено, что коэффициент трения между карбонизованными углеродными волокнами выше по сравнению с графитированными.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментов по изучению трибологических характеристик (коэффициент трения и интенсивность



изнашивания) углерод-углеродных композитных материалов при высоких температурах без влияния окислительных эффектов. Известно, что при достижении определенных температур углерод в воздушной среде начинает активно взаимодействовать с кислородом, вызывая его горение, что в свою очередь увеличивает износ. В этой главе исследовались три отечественных и один зарубежный углерод-углеродный композитный материал, отличие между ними были как в методике производства, так и в выборе исходного сырья. Для экспериментального исследования для трибометра была изготовлена камера позволяющая проводить испытания без доступа кислорода при высоких температурах, вызванных фрикционным разогревом. Экспериментальное исследование, как и в первой главе, было выполнено согласно методике двухфакторного планированного эксперимента. Фрикционная пленка, образующаяся на дорожке трения, изучалась методом Рамановской спектроскопии. Основными результатами в этой главе являются регрессионные зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания от давления и скорости скольжения в исследуемых диапазонах изменения нагрузок и скоростей в бескислородной среде, а также полученный вывод, что пленка может состоять как из частиц износа матрицы, так и углеродных волокон. Также показано, что композиты на основе карбонизованных углеродных волокон имеют более стабильный и высокий коэффициент трения с сохранением высокой износостойкости, чем на основе графитированных углеродных волокон, что совпадает с выводами, полученными в предыдущих двух главах при испытании композитов в условиях комнатных температур.

В **четвертой** главе на основе теоретико-экспериментального подхода изучено контактно-усталостное разрушение поверхностных слоев углерод-углеродных композитных материалов. Для построения модели на макроуровне проведены эксперименты на многоцикловую контактную усталость углерод-углеродных композитов. Для быстрого обнаружения данного эффекта эксперименты проведены с использованием сферического контр-тела. Исследовались отечественные углеродные композиты, отличающиеся своей внутренней структурой. Выполнено моделирование на макроуровне процесса циклического нагружения композита и накопления в нем усталостных повреждений с

использованием усредненных механических характеристик исследуемых композитов, на основании которого рассчитаны количество циклов до разрушения и глубина зарождения усталостной трещины. Сравнение экспериментально определенной глубины разрушения и рассчитанной глубины зарождения усталостной трещины показало их удовлетворительное соответствие. Важным результатом этой главы является разработка теоретико-экспериментального метода расчета параметров функции поврежденности композитного материала на макроуровне.

В заключении работы сформулированы основные результаты проведенного исследования.

### **Научная новизна**

К наиболее существенным и оригинальным следует отнести следующие результаты:

1. Предложена и отработана экспериментальная методика определения коэффициента трения между жгутами углеродных волокон по схеме контакта перекрещивающиеся цилиндры.
2. Проведено экспериментальное исследование фрикционного взаимодействия двух пересекающихся жгутов углеродных волокон при повышенных температурах (до 300 °С) и получены зависимости коэффициента трения от объемной температуры и контактной нагрузки.
3. Предложена экспериментальная методика определения трибологических характеристик углерод-углеродных композитных материалов в бескислородной среде, что исключает воздействие окислительных эффектов на искомые параметры. Проведены высокотемпературные испытания (до 1000 °С) углерод-углеродных композитных материалов по схеме контакта кольцо-кольцо в бескислородной среде и получены регрессионные зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания в исследуемых диапазонах изменения нагрузок и скоростей скольжения.
4. Построена расчетная модель разрушения углерод-углеродных композитных материалов в условиях циклического контактного нагружения, основанная на анализе функции поврежденности материала на макроуровне. Построенная модель показала удовлетворительное соответствие с экспериментальными результатами.



### **Оценка практической значимости результатов**

Практическая значимость заключается в том, что полученные экспериментальные зависимости трибологических характеристик (коэффициент трения и интенсивность изнашивания) от контактных давлений и скоростей скольжения в исследованных диапазонах изменения этих характеристик могут быть использованы для проектирования/модернизации авиационных тормозных дисков. Полученные зависимости для расчета контактно-усталостного разрушения могут использоваться для прогнозирования процессов накопления повреждений и усталостного разрушения углерод-углеродных композитов в условиях их циклического контактного нагружения.

### **Обоснованность и достоверность научных положений, результатов и заключений диссертации**

Достоверность результатов диссертационной работы обусловлена использованием при экспериментальных исследованиях современного высокоточного научного оборудования, средств измерения, метода планирования эксперимента, а также воспроизводимостью результатов экспериментов. Экспериментальное исследование проведено с необходимым количеством испытаний для применения статистических оценок. Теоретические результаты получены с использованием адекватных математических моделей, вытекающих из постановки и решения контактной задачи теории упругости. Их достоверность подтверждается соответствием результатов моделирования экспериментальным данным.

Результаты и положения, выносимые на защиту, являются научно обоснованными, непротиворечивыми, подтвержденными экспериментальными исследованиями.

### **Замечания и вопросы**

По тексту диссертации имеются 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 решения контактной задачи, расчета выражений для компонент напряжений, выбора 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 напряжений, 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 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.



## Заключение

Приведенные замечания не изменяют общей положительной оценки диссертации, и не снижают ее ценности.

Работа представляет собой законченное научное исследование и соответствует квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертационным работам, соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842, а ее автор Буковский Павел Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Отзыв о диссертации Буковского П. О. составлен доктором технических наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела) Власовым Александром Николаевичем и кандидатом физико-математических наук (01.01.07 – Вычислительная математика) Волковым-Богородским Дмитрием Борисовичем. Отзыв обсужден и одобрен на расширенном заседании отдела Механики структурированной и гетерогенной среды (протокол УС 04/23 от 18.07.2023).

Директор института прикладной механики РАН,

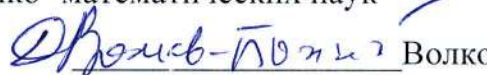
Доктор технических наук



Власов Александр Николаевич

Ведущий научный сотрудник института прикладной механики РАН,

кандидат физико-математических наук



Волков-Богородский Дмитрий Борисович

Подписи д.т.н. Власова А.Н. и к.ф.-м.н. Волкова-Богородского Д.Б. заверяю.

Ученый секретарь ИПРИМ РАН, кандидат физико-математических наук



Ю.Н.Карнет