

На правах рукописи

Буковский Павел Олегович

**ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ  
ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ  
КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук.

Научный руководитель: **Горячева Ирина Георгиевна**  
академик РАН, д.ф.-м.н., профессор,  
заведующий лабораторией трибологии  
ИПМех РАН

Официальные оппоненты: **Беляк Ольга Александровна**  
д.ф.-м.н., профессор кафедры  
Теоретической механики ФГБОУ ВО  
«Ростовский государственный университет  
путей сообщения»

**Степашкин Андрей Александрович**  
к.т.н., доцент кафедры Физической химии  
ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский технологический  
университет «МИСИС»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт прикладной  
механики Российской академии наук  
(ИПРИМ РАН)

Защита состоится 26 октября 2023 г. в 15 часов на заседании  
диссертационного совета 24.1.098.01 на базе ИПМех РАН по адресу: просп.  
Вернадского 101, корп. 1, Москва.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПМех РАН  
<https://ipmnet.ru/files/diss/2023/3/Bukovskiy-diss.pdf>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.098.01  
к.ф.-м.н.

Е.Я. Сысоева

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** В связи с широким применением углерод-углеродных композитных материалов (УУКМ) в различных технических устройствах большое внимание уделяется теоретико-экспериментальному исследованию их механических и фрикционных характеристик при различных видах нагружения. В частности, разработаны методы определения эффективных и/или осредненных характеристик УУКМ (Nemat-Nasser S., Hori M., 1993; Kim B.R., Lee H.K., 2009; Xu Y.J., You T., Du C.L., 2015; Hashin Z., 1990; Bucci D.V., Koczak M.J., Schadler L.S., 1997; Lamon J., 2001; Sharma R., Mahajan P., Mittal R.K., 2013). Распространенным методом оценки поведения УУКМ при нагружении является конечно-элементное моделирование (Wang L., Wu J., Chen C., Zheng C., Li B., Joshi S.C., Zhou K., 2017; Wang L., Zhao B., Wu J., Chen C., Zhou K., 2018). Также используются аналитические модели (Dimitrienko Y., 1997, 1998; Kim J., Lee W.I., Tsai S.W., 2002; Kim J., Lee W.I., Lafdi K., 2003; Kim B.R., Lee H.K., 2009; Xu Y.J., Zhang P., Zhang W.H., 2015). Их преимуществом является не только получение глобальных свойств УУКМ, но и анализ их зависимости от микроструктуры. При моделировании разрушения однонаправленных композитных материалов, таких как нетканые материалы, широко применяется критерий Хашина (Hashin Z., 1990) из-за простоты концепции и удобства использования. Также критерий Хашина можно использовать для прогнозирования возникновения повреждений в волокнистых композитах (Ferreira L.M., Graciani E., París F., 2019; Zhou J., Wen P., Wang S., 2019). Разработке аналитических методов определения скорости изнашивания УУКМ и изменения формы поверхности в условиях фрикционного взаимодействия посвящены работы Горячевой И.Г. и Маховской Ю.Ю. (Горячева И.Г., Маховская Ю.Ю., 2020, 2021). В цикле работ Шпенев А.Г. разработаны модели трения и изнашивания волокнистых композитов при воздействии частиц износа в области контакта (Шпенев А.Г., 2018) и разогрева на микроуровне (Шпенев А.Г., 2020), а также модель влияния термоупругой неустойчивости на изнашивание авиационных тормозных дисков в целом (Шпенев А.Г., 2021).

Большой вклад в развитие экспериментальных методов оценки трибологических свойств углерод-углеродных композитных материалов внесли Аваши и Вуд (Awasthi S., Wood J.L., 1985). В России можно отметить школу профессора Чичинадзе А.В. в которой большое внимание уделяли

постановке и проведению экспериментальных исследований УУКМ для авиационных тормозных дисков при различных условиях нагружений и температур. С целью повышения жесткости и прочности УУКМ, в том числе на границе раздела волокно/матрица, ведутся интенсивные работы не только по созданию высокомодульных и высокопрочных волокон, но и по модификации их поверхности (Симамура С., 1987; Лысенко А.А., Гладунова О.И., 2019; Нурмухаметова А.Н., Хамидуллин А.Р., Зенитова Л.А., 2020). В цикле работ Ву с соавторами (Wu S. et al., 2016, 2017) изучена зависимость прочности границы раздела волокно/матрица от поверхностной структуры углеродного волокна.

При фрикционном взаимодействии УУКМ происходит их значительный разогрев с последующим окислением углерода вблизи области контакта (Windhorst T., Blount G., 1997), что в значительной степени влияет на трибологические свойства. По меньшей мере 60% общей потери веса УУКМ в процессе трения происходит из-за термического окисления (Chang H.W., Rusnak R.M., 1978). Как и в случае с чистым графитом, считается, что углеродный композит на воздухе начинает окисляться при температуре около 400°C (Luthra K.L., 1988; Shi X., 2008; Чичиназде А.В. и др., 2009).

Циклическое нагружение углерод-углеродных композитов приводит к усталостному износу границы раздела волокно/матрица и к образованию трещин в матрице (Ozturk A., 1996; Wang S., Shui X., Fu X., Chung D.D.L., 1998; Chowdhury P., Sehitoglu H., Rateick R., 2018). Несмотря на широту экспериментальных работ по исследованию усталостного разрушения углерод-углеродных композитов, не выделено доминирующего аспекта, ответственного за данный вид разрушения (Yang X., Li H., Yu K., Zhang S., 2013; Lu X., Xiao P., 2014; Stepashkin A.A., Ozherelkov D.Yu., Sazonov Yu.B., Komissarov A.A., 2019). На сегодняшний день также отсутствует модель контактно-усталостного разрушения углерод-углеродного композитного материала.

Сейчас в России происходит постепенный уход от использования зарубежных углеродных материалов для изготовления тормозных дисков в авиационной промышленности. В связи с этим происходит ускоренная разработка или модернизация (улучшение) уже имеющихся в нашей стране углерод-углеродных композитных материалов фрикционного назначения, которые по физико-механическим, тепловым и трибологическим свойствам

не должны уступать зарубежным аналогам. Проведение натуральных стендовых экспериментальных исследований сопровождается не только большой длительностью, но и их чрезвычайно высокой стоимостью. Поэтому возникает острая необходимость лабораторных испытаний на модельных образцах с целью выявления наилучших экземпляров для их дальнейшего исследования, в том числе на основе натуральных и стендовых экспериментов, а также с целью изучения механизмов трения и изнашивания углерод-углеродных композитов разной структуры, определения влияния механических, геометрических и прочностных свойств отдельных структурных элементов и их расположения в матрице на величину коэффициента трения и характер разрушения поверхностных слоев материала при разных режимах фрикционного взаимодействия. Совместное использование результатов экспериментальных исследований и моделирования процессов, происходящих на фрикционном контакте, дает возможность не только прогнозировать долговечность по износу рассматриваемой пары трения, но и сформулировать требования к свойствам структурных составляющих и характеру их размещения в матрице, которые обеспечат повышение износостойкости рассматриваемой пары трения при заданных условиях эксплуатации. Такие требования также помогут технологам в разработке новых более долговечных материалов для узлов трения, в том числе углерод-углеродных композитных материалов для авиационных тормозов.

**Целью** диссертационной работы является:

- экспериментальное лабораторное исследование трибологических характеристик (коэффициент трения, скорость изнашивания) разрабатываемых нашей промышленностью фрикционных углерод-углеродных композитных материалов в условиях трения скольжения одноименных пар трения;
- изучение механизмов трения и изнашивания исследуемых материалов при различных нагрузочно-скоростных параметрах взаимодействия;
- моделирование контактно-усталостного разрушения подповерхностных слоев углеродных композитов в условиях циклически изменяющегося поля напряжений.

Для достижения намеченных целей были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать методику и провести экспериментальные исследования направленные на изучение влияния нагрузочно-скоростных параметров контактного взаимодействия и образующейся на поверхностях взаимодействующих тел пленки (третьего тела) на трибологические свойства (коэффициент трения, скорость изнашивания) углерод-углеродных композитных материалов при различных схемах испытаний (шарик/палец–диск, кольцо–кольцо).
2. Разработать оснастки (держатели) для жгутов (пучков) углеродных волокон и провести экспериментальные исследования по определению коэффициента трения между жгутами углеродных волокон на микротрибометре УМТ-3МТ по схеме контакта перекрещивающиеся цилиндры.
3. Спроектировать и создать камеру для проведения экспериментальных исследований трибологических свойств углерод-углеродных композитов при высоких температурах, вызванных фрикционным разогревом. Камера должна исключить эффект окисления поверхностей композитов, а также экранировать измерительную часть трибометра от потоков тепла.
4. Провести экспериментальные исследования разрушения поверхностных слоев углерод-углеродных композитных материалов разной структуры, характеризуемой геометрическими размерами волокон, их прочностью и плотностью расположения в композите, в условиях циклического фрикционного взаимодействия по схеме шарик–диск.
5. Выполнить расчет внутренних напряжений и накопления контактно-усталостных повреждений в экспериментально исследуемых композитах, механические свойства которых описываются их осредненными модулями упругости, и провести сравнение с результатами проведенных экспериментов.
6. На основе моделирования и результатов экспериментальных исследований получить характеристики функции накопления поврежденности для исследуемых композитов с целью прогнозирования их контактно-усталостных разрушений в условиях произвольного циклически меняющегося распределения контактных напряжений.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Предложены экспериментальные методики: определения коэффициента трения между пучками углеродных волокон по схеме контакта перекрещивающихся цилиндров; определения трибологических свойств углерод-углеродных композитов в бескислородной среде, что позволило исключить деградацию углерода (окисление) при повышенных температурах.
2. Впервые экспериментально измерен коэффициент трения при взаимодействии двух перекрещивающихся пучков углеродных волокон, которые используются при армировании углерод-углеродных композитов, и построены зависимости коэффициента трения от объемной температуры и контактной нагрузки; в частных случаях показана их корреляция с аналогичными зависимостями для композитов в целом.
3. Для модельных образцов углерод-углеродных фрикционных композитов впервые проведены экспериментальные исследования по схеме контакта кольцо–кольцо в бескислородной среде при высоких температурах (до  $T = 1000^{\circ}\text{C}$ ), вызванных фрикционным разогревом. На основании математической обработки экспериментальных данных методом регрессионного анализа получены зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания от скорости скольжения и нормальной нагрузки. Проведен анализ возникающей на контактирующих поверхностях пленки и фрикционного разогрева поверхности при разных нагрузочно-скоростных параметрах взаимодействия.
4. Получены аналитические зависимости для расчета глубины и времени зарождения контактно-усталостной трещины в исследуемых волокнистых углерод-углеродных композитах различной структуры в условиях их циклического нагружения.

**Достоверность** результатов обусловлена использованием при экспериментальных исследованиях современного высокоточного лабораторного оборудования, средств измерения, а также повторяемостью и воспроизводимостью результатов экспериментов. Эксперименты проведены с должным количеством испытаний с использованием статистических методов оценки погрешности измерения.

Теоретические результаты получены с использованием обоснованных математических моделей, вытекающих из постановки и решения контактной задачи теории упругости, их достоверность также подтверждается удовлетворительным соответствием результатов моделирования с экспериментальными данными.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что полученные экспериментальные зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания от нагрузочно-скоростных параметров взаимодействия могут быть использованы для проектирования (усовершенствования) авиационных тормозных дисков, что существенно сократит число предварительных тестов, необходимых для оценки их фрикционных характеристик и долговечности по износу.

Экспериментально установлено, что армирование композитов карбонизованным волокном различной длины приводит к увеличению значения коэффициента трения.

Показано, что углеродные композиты с дополнительным перпендикулярным армированием вследствие лучшего отведения тепла от поверхности трения имеют низкий износ с сохранением высоких значений коэффициента трения.

Полученные зависимости для расчета контактно-усталостного разрушения исследуемых углерод-углеродных композитов применимы для прогнозирования их разрушения в условиях циклических нагрузений в достаточно широком диапазоне нагрузочно-скоростных параметров.

**Объектами исследования** являлись хаотично армированные и структурированные углерод-углеродные композитные материалы, изготовленные по различным методикам (метод химического осаждения из паровой фазы и метод жидкофазной пропитки), а также коммерчески доступные углеродные волокна с различной степенью графитации и изготовленные по различным технологиям.

**Методы исследования.** Экспериментальные исследования проведены в лабораторных условиях с применением современных приборов и установок, таких как: трибометры UMT-2 (CETR, США) и UMT-3MT (CETR, США), оптический профилометр S neox (SensoFar, Испания), атомно-силовой микроскоп SmartSPM™ (AIST-NT, Россия), сканирующие электронные микроскопы Quanta 650 (FEI, США) и Tescan Vega 3 SBH (Tescan, Чехия), Рамановские спектрометры inVia Reflex (Renishaw,



Великобритания) и inVia Qontor (Renishaw, Великобритания). Температура вблизи поверхности образцов определялась с применением контактной термопары, которая обеспечивает минимальную ошибку ( $\pm 2\%$ ).

Разработанные теоретические модели основаны на методах решения контактных задач теории упругости, методах осреднения механических характеристик неоднородных сред, методах расчета накопления контактно-усталостных повреждений в условиях циклического характера нагрузжений.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Экспериментально установленные зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания от нагрузки и скорости в исследуемых диапазонах изменения нагрузочно-скоростных параметров при различных схемах контактного взаимодействия (палец-диск, кольцо-кольцо).
2. Экспериментальные методики определения коэффициента трения между пучками углеродных волокон по схеме контакта перекрещивающихся цилиндров и определения трибологических свойств углерод-углеродных композитов в условиях их одноименного фрикционного взаимодействия в бескислородной среде (для исключения деградации углерода, вызванного его окислением).
3. Алгоритм расчета трибологических свойств (коэффициент трения и интенсивность изнашивания) углерод-углеродных композитных материалов, основанный на математической обработке экспериментальных данных методом регрессионного анализа.
4. Метод расчета внутренних напряжений и накопления контактно-усталостных повреждений в волокнистых углеродных композитах, механические свойства которых описываются осредненными модулями упругости.
5. Теоретико-экспериментальный метод расчета контактно-усталостных характеристик волокнистых углерод-углеродных композитных материалов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на 8 всероссийских и 4 международных научных конференциях:

1. VI Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», Москва, Россия, 26-27 ноября 2019.

2. Научные чтения им. чл. – корр. РАН И.А. Одингса Механические свойства современных конструкционных материалов, Москва, Россия, 17-18 сентября 2020.
3. XV Всероссийская школа-конференция для молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии», Новосибирск, Россия, 25 февраля - 5 марта 2021.
4. Научная конференция «Ломоносовские чтения – 2021 (секция механики)», Москва, Россия, 20-26 апреля 2021.
5. XXVII Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова, Вятчи, Россия, 17-21 мая 2021.
6. 27-ая Всероссийская конференция по численным методам решения задач теории упругости и пластичности, посвященная 100-летию со дня рождения Н.Н. Яненко, Красноярск, Россия, 5-9 июля 2021.
7. Международный Симпозиум по Трибологии YarTribNord – 2021, Ярославль, Россия, 14-15 сентября 2021.
8. XI Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, 23-25 ноября 2021.
9. 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Москва, Россия, 29 ноября - 3 декабря 2021.
10. VII Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», Москва, Россия, 14-16 декабря 2021.
11. Научная конференция «Ломоносовские чтения – 2022 (секция механики)», Москва, Россия, 18-22 апреля 2022.
12. Всероссийская конференция молодых ученых-механиков YSM-2022, Сочи, Россия, 4- 14 сентября 2022.

Научные исследования, проведенные в диссертационной работе, осуществлялись в рамках гранта РФФИ: 19-19-00548 «Моделирование и экспериментальное исследование изнашивания волокнистых фрикционных композитов».

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в работах [1-14], изданных в периодических научных изданиях, сборниках

материалов и тезисов конференций. Список публикаций приведен в конце автореферата, среди которых 4 статьи [1-4] напечатаны в периодических журналах, рекомендованных ВАК РФ и/или индексируемых в Web of Science, Scopus.

**Личный вклад автора.** 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 UMT-3MT (CETR, США). Совместно с А.В. Морозовым была произведена модернизация лабораторного трибометра UMT-2 (CETR, 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»).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 134 страницы, включая 28 рисунков и 16 таблиц. Список литературы содержит 181 наименование.

**Соответствие паспорту научной специальности.** По теме и содержанию материалов исследования диссертационная работа соответствует актуальному паспорту специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, в части п. 1 «Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых», п. 4 «Механика композиционных материалов и конструкций, механика интеллектуальных материалов» и п. 13 «Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях».

## Содержание работы

Во **введении** представлен обзор литературы, посвященный тематике данного исследования, обоснована актуальность экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, сформулирована цель, поставлены задачи работы, изложена научная новизна и практическая значимость представляемой работы, описаны методы исследований, сформулированы результаты, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена экспериментальному исследованию коэффициента трения и формирования пленки (третьего тела) в условиях скольжения углеродных композитов.

Рассматривались три группы углерод-углеродных композитных материалов (УУКМ), различающихся своей внутренней структурой (геометрические размеры волокон, их прочность и плотность распределения). Первые две группы (УУКМ1 и УУКМ2) были изготовлены на основе графитированного углеродного волокна и отличались между собой длиной волокна в готовом материале (40 и 0,5 мм соответственно), а третья группа (УУКМ3) на основе карбонизованного углеродного волокна длиной 40 мм. На рисунке 1 представлены СЭМ фотографии микроструктуры поверхностей трения перед трибологическими испытаниями. Для УУКМ1 (рисунок 1, *а*) и УУКМ3 (рисунок 1, *в*) характерно, что волокна на поверхности трения находятся в большом скоплении в виде жгутов, а для УУКМ2 (рисунок 1, *б*) волокна на поверхности находятся преимущественно в виде отдельных волокон.

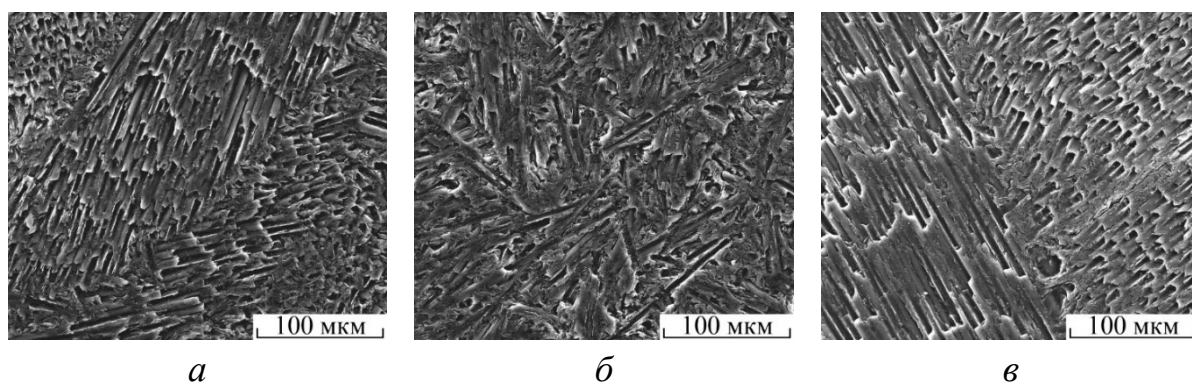


Рисунок 1. СЭМ фотографии исследуемых образцов УУКМ1 (*а*), УУКМ2 (*б*), УУКМ3 (*в*)

Экспериментальное исследование проводилось на лабораторном трибометре УМТ-2 по схеме контакта палец-диск (рисунок 2) при

комнатной температуре ( $T = 23^{\circ}\text{C}$ ) в диапазоне скоростей скольжения  $V = 0,03 \dots 0,3$  м/с и интервале нормальных давлений  $P$  от 2 до 22 МПа. Все испытания проводились для одноименных пар трения.

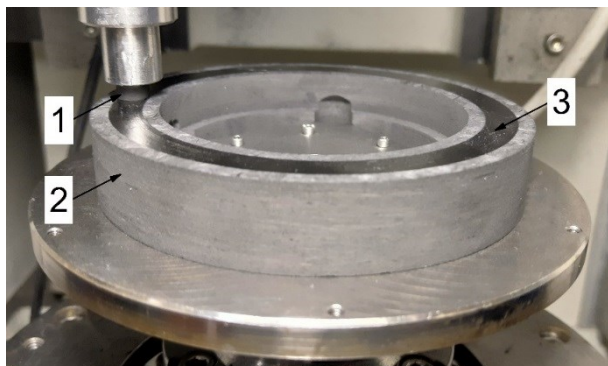


Рисунок 2. Типичная фотография исследуемой пары трения: где 1 – углеродный палец; 2 – кольцевой образец; 3 – сформированная пленка трения

Испытания образцов проводилось в соответствии с методикой полного факторного эксперимента (ПФЭ), использование которой позволяет достаточно просто и эффективно количественно оценить все линейные эффекты факторов и их взаимодействия. Уравнение зависимости коэффициента трения  $\mu$  от удельной нагрузки и скорости скольжения определяли по

результатам ПФЭ с вариацией двух факторов  $P$  и  $V$  на двух уровнях (минимальном и максимальном). Уравнение линейной регрессии представим в виде (Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., 1980):

$$\tilde{y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_1X_2, \quad (1)$$

где  $\tilde{y}$  – искомая функция оптимизации;  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – коэффициенты уравнения регрессии;  $X_1, X_2$  – безразмерные факторы, зависящие от нагрузки и скорости.

Коэффициенты уравнения регрессии запишутся в виде:

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{4}[\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4], & b_1 &= \frac{1}{4}[-\bar{y}_1 + \bar{y}_2 - \bar{y}_3 + \bar{y}_4], \\ b_2 &= \frac{1}{4}[-\bar{y}_1 - \bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4], & b_3 &= \frac{1}{4}[\bar{y}_1 - \bar{y}_2 - \bar{y}_3 + \bar{y}_4], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\bar{y}_i$  – среднее значение параметра оптимизации, которое вычисляется из экспериментальных данных, а связь между кодированными переменными  $X_1, X_2$  и  $P, V$  запишется:

$$X_1 = \frac{P - \chi_{1,0}}{\Delta\chi_1}, \quad X_2 = \frac{V - \chi_{2,0}}{\Delta\chi_2}, \quad (3)$$

где  $\chi_{1,0}, \chi_{2,0}$  – основные уровни варьирования нагрузки и скорости, соответственно;  $\Delta\chi_1, \Delta\chi_2$  – полуинтервалы варьирования нагрузки и скорости.

В таблице 1.2 представим результаты кодирования двух факторов: нормальной нагрузки  $P$  и скорости скольжения  $V$ .

Таблица 1. Кодирование факторов

№ п/п	Уровень варьирования	Кодовое обозначение	$P$ , МПа ( $F$ , Н)		$V$ , м/с ( $n$ , об/мин)	
			$\chi_1$	$X_1$	$\chi_2$	$X_2$
1	Нижний	- 1	2 (49)	-1	0,03 (9)	-1
2	Верхний	+ 1	22 (540)	+1	0,3 (89)	+1
3	Основной	0	12 (295)	0	0,165 (49)	0
4	Полуинтервал	$\Delta\chi_i$	10 (245)	1	0,135 (40)	1

Проверка дисперсии эксперимента  $S^2(y)$  и ошибки всего эксперимента  $S(y)$ , проводились по формулам  $S^2(y) = \sum_{i=1}^N S_i^2 / N$  и  $S(y) = \sqrt{S^2(y)}$ , где  $N$  – количество опытов;  $S_i^2$  – дисперсия параллельных экспериментов для  $i$ -го опыта.

В работе проводилась проверка значимости коэффициентов (2) уравнения регрессии (1) с целью его упрощения путем исключения статистически незначимых коэффициентов. Для этого использовался критерий Стьюдента. Затем рассчитанные по уравнению (1) значения коэффициента трения и/или коэффициента износа сравнивались с полученными экспериментальными значениями, что позволило определить параметр адекватности  $S_{ад}^2$ :

$$S_{ад}^2 = \frac{r}{N - g} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \tilde{y}_i)^2, \quad (4)$$

где  $r$  – количество повторов экспериментов;  $N$  – число опытов;  $g$  – число значимых коэффициентов уравнения регрессии.

Для проверки адекватности уравнения регрессии (1) полученное с использованием (4) значение критерия Фишера  $F = S_{ад}^2 / S^2(y)$  сравнивалось с табличным критическим значением  $F_T$  (Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., 1980) и проверялось условие  $F \leq F_T$ .

Для определения из каких частиц износа состоит образующаяся в зоне фрикционного взаимодействия пленка (третье тело) (рисунок 2) использовался метод Рамановской спектроскопии. Преимуществом выбранного метода является возможность проведения неразрушающих измерений без сложной подготовки образца, при этом сбор данных не

занимает много времени. Рамановские спектры дорожки трения на образцах УУКМ были получены на приборе inVia Qontor (Renishaw, Великобритания) с использованием возбуждающего зеленого лазера с длиной волны 532 нм.

В разделе 1.2 приведены математические расчеты коэффициента трения, основанные на регрессионном анализе экспериментальных данных по описанной выше методике. Для построения расчетного уравнения (1) были вычислены его регрессионные коэффициенты (2) и получены следующие уравнения регрессий для определения коэффициентов трения для каждого материала:

$$\begin{aligned}\tilde{\mu}_{\text{УУКМ1}} &= 0,166 + 0,0013X_1 + 0,0066X_2 - 0,0028X_1X_2, \\ \tilde{\mu}_{\text{УУКМ1}} &= 0,202 - 0,0008X_1 - 0,0052X_2 - 0,0032X_1X_2, \\ \tilde{\mu}_{\text{УУКМ1}} &= 0,222 - 0,0094X_1 + 0,0011X_2 - 0,0056X_1X_2.\end{aligned}\quad (5)$$

Проверка на значимость коэффициентов этих уравнения регрессии при помощи критерия Стьюдента показала, что  $b_1, b_2, b_3$ , для всех уравнений (5) оказываются статистически незначимыми, поэтому следует:

$$\mu_{\text{УУКМ1}} = 0,166 \pm 0,03, \mu_{\text{УУКМ2}} = 0,202 \pm 0,03, \mu_{\text{УУКМ3}} = 0,222 \pm 0,03. \quad (6)$$

Полученные результаты (6) показывают, что для всех испытанных УУКМ коэффициент трения не зависит от удельной нагрузки и скорости скольжения в рассмотренном диапазоне изменения нагрузочно-скоростных параметров ( $P = 2 \dots 22$  МПа,  $V = 0,03 \dots 0,3$  м/с).

На рисунке 3 приведены экспериментальные зависимости коэффициента трения от удельной нагрузки  $P$  и скорости скольжения  $V$  для всех трех исследуемых композитов. Закрашенные области на графиках соответствуют построенным согласно (6) значениям коэффициента трения с доверительными интервалами для всех исследуемых УУКМ.

Анализ рисунка 3 позволяет сделать вывод: наблюдается слабая зависимость коэффициента трения от номинального давления для всех материалов. Образцы композитного материала, изготовленного с использованием карбонизованных волокон (УУКМ3), демонстрирует самые высокие значения коэффициента трения в сравнении с образцами на основе графитированных волокон. Следует отметить, что для всех исследуемых образцов существует незначительная зависимость коэффициента трения от скорости скольжения (рисунок 3).

Для всех материалов экспериментально измеренный коэффициент трения (см. рисунок 3) находится в доверительных интервалах рассчитанных на основе регрессионного анализа значений (6), которые на

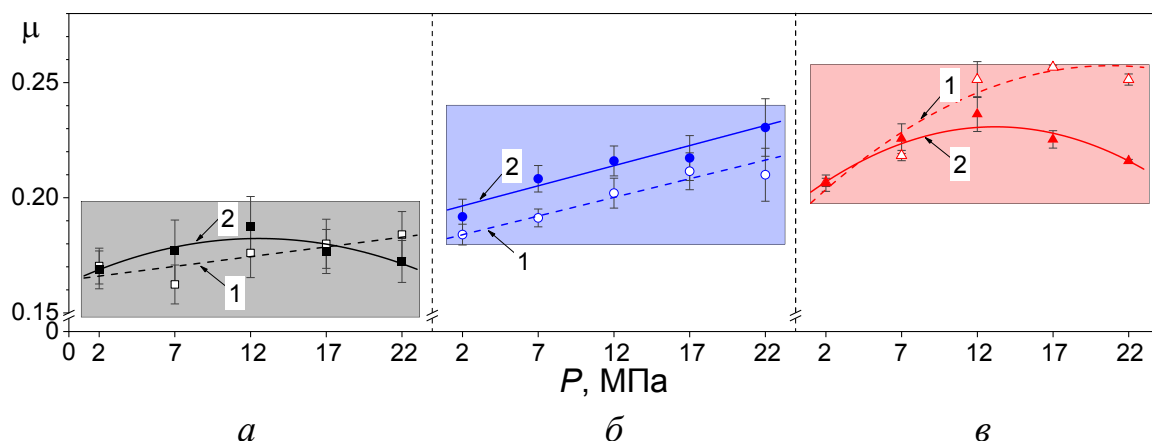


Рисунок 3. Зависимости коэффициента трения  $\mu$  от удельной нагрузки  $P$ , полученные для образцов, УУКМ1 (а), УУКМ2 (б), УУКМ3 (в): где 1 –  $V = 0,03$  м/с; 2 –  $V = 0,3$  м/с

рисунке обозначены закрашенными областями. Полученные результаты демонстрируют адекватное описание экспериментальных данных полученными уравнениями регрессий.

Для определения состава пленки (третьего тела) при помощи Раман спектроскопии были получены спектры, измеренные как на дорожках трения, так и за ее пределами (рисунок 4). Раман спектр углеродных материалов содержит три основные полосы: D-полоса в области  $1350\text{ см}^{-1}$ , G-полоса в области  $1580\text{ см}^{-1}$  и S-полоса в области  $2700\text{ см}^{-1}$ .

На дорожках трения в основном преобладают участки характерные для наноструктурированных углеродных материалов и углеродных волокон (спектр 2), тогда как вне дорожки трения спектр характерен для хорошо закристаллизованного графита (спектр 1). На основании рисунка 4 можно сделать вывод: третье тело на дорожке трения состоит в основном из частиц износа углеродных волокон.

Таким образом, в **первой главе** на основе математической обработки экспериментальных данных методом регрессионного анализа в исследуемых диапазонах изменения нагрузочно-скоростных параметров установлено:

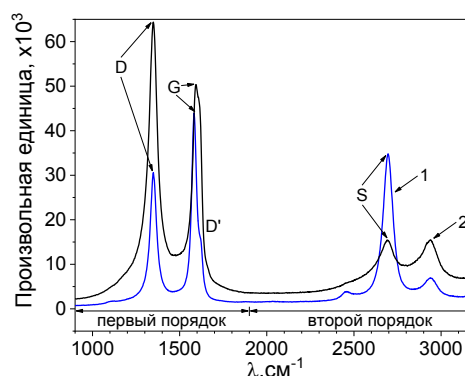


Рисунок 4. Типичный вид Рамановского спектра для всех исследуемых образцов, где 1 – вне дорожки трения; 2 – на дорожке трения



- для всех рассмотренных материалов коэффициент трения  $\mu$  не зависит от удельной нагрузки  $P$  и скорости скольжения  $V$ ;
- УУКМ на основе карбонизованных волокон (УУКМЗ) имеют коэффициент трения, превышающий в 1,5 раза коэффициент трения для композита на основе длинных графитированных волокон (УУКМ1).

Микроскопические исследования поверхности композитов с помощью СЭМ - Quanta 650 и Раман спектроскопии - inVia Qontor показали, что на поверхности трения образуется пленка, представляющая собой тонкий слой, состоящий, главным образом, из частиц износа углеродных волокон.

**Во второй главе** проведены исследования влияния температуры и нагрузки на коэффициент трения между пучками (жгутами) углеродных волокон. Для трибологических испытаний были выбраны две группы углеродных волокон: карбонизованные (с финишной термообработкой  $T = 1400^\circ\text{C}$ ) и графитированные (с финишной термообработкой  $T = 2800^\circ\text{C}$ ). Для получения сравнительного анализа в работе были использованы коммерчески доступные углеродные волокна двух производителей: волокно УК (ООО Аргон, г. Балаково, Россия) и волокно Zoltek Panex 35 (Zoltek Inc., Венгрия).

Исследование влияния нормальной нагрузки и объемной температуры на коэффициент трения между жгутами углеродных волокон было осуществлено при помощи лабораторного микротрибометра УМТ-3МТ по схеме перекрещивающихся цилиндров. Для проведения экспериментальных испытаний были изготовлены специальные держатели, принципиальная схема которых представлена на рисунке 5. Испытание образцов проводили при постоянной нагрузке  $F$ , которая была равной 0,2 и 1 Н (5 и 100 г, соответственно) и двух температурах  $T = 23$  и  $300^\circ\text{C}$ .

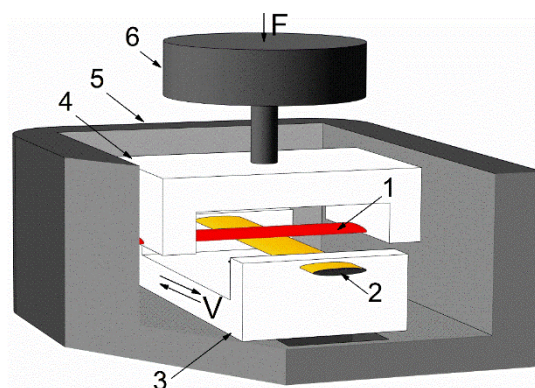


Рисунок 5. Принципиальная схема трибометра, где 1, 2 – пучки волокон, закрепленные в своих держателях (3, 4); 5 – термокамера; 6 – 2-х компонентный датчик сил

Испытание образцов проводили при постоянной нагрузке  $F$ , которая была равной 0,2 и 1 Н (5 и 100 г, соответственно) и двух температурах  $T = 23$  и  $300^\circ\text{C}$ .

Жгут волокон 1 в натянутом состоянии закреплялся в неподвижный держатель 4, который через жесткий шток крепился к 2-х компонентному датчику сил ( $F_z$ ,  $F_x$ ) и моментов ( $T_z$ ,  $T_x$ ) 6, к которому посредством винтовой передачи (не показан на рисунке 5) прикладывалась нагрузка  $F$ . Другой жгут с волокнами 2 закреплялся в держателе 3, который совершал возвратно-поступательное движение за счет кривошипно-шатунного механизма, вращательное движение к которому передавалось от шагового электродвигателя (не показан на рисунке 5). Держатели жгутов 3 и 4 помещались в термокамеру 5. Термокамера закрывалась крышкой, после осуществлялся нагрев жгутов волокон до заданной оператором температуры с последующей выдержкой в течение  $60 \pm 5$  минут. Частота возвратно-поступательного движения жгута 3 была постоянно равной 1 Гц, а амплитуда перемещения составляла 6 мм.

Исследования поверхности углеродных волокон до и после трибологических испытаний были проведены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan Vega 3 SBH. Для изучения шероховатости волокна использовалась сканирующая зондовая микроскопия, основной разновидностью которой является атомно-силовая микроскопия (АСМ).

На рисунке 6 представлены СЭМ и АСМ изображения поверхности всех исследуемых карбонизованных и графитированных углеродных волокон разных производителей (всего 4 группы) до и после трибологических испытаний.

Анализ полученных изображений (рисунок 6) позволяет сделать следующие выводы: рельеф поверхности карбонизованных волокон до (рисунок 6, а, б) и после (рисунок 6, д, е) трения не изменяется и имеет фибриллярную структуру, ориентированную в направлении продольной оси волокна; при трении графитированного волокна марки УК наблюдается его быстрое разрушение (рисунок 6, ж), в отличие от графитированного волокна марки Zoltek (рисунок 6, з), что объясняется низкой прочностью волокна марки УК.

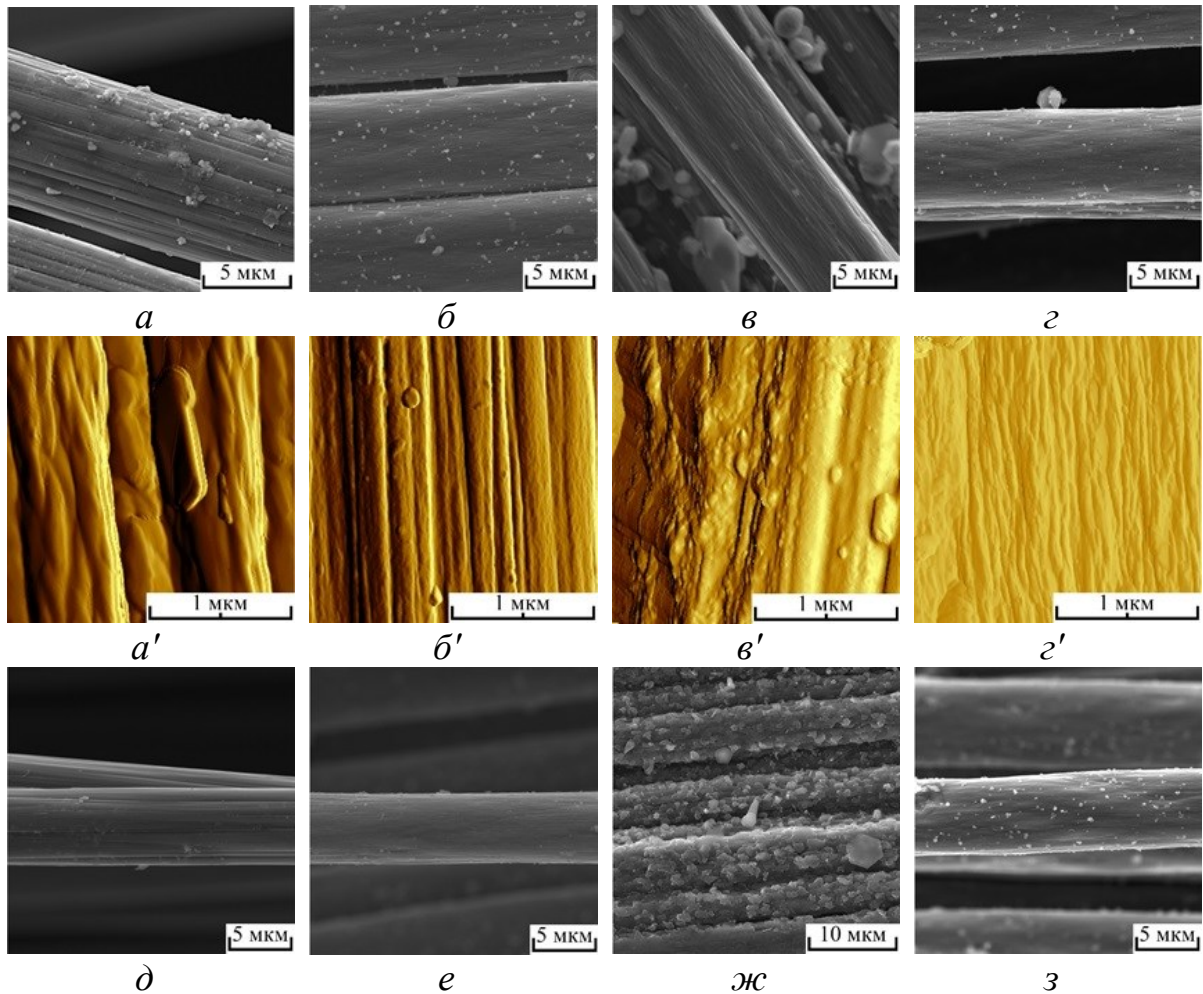


Рисунок 6. Типичные СЭМ и АСМ изображения углеродных волокон до (а-г) и после (д-з), где (а, д) – карбонизованные и (в, ж) – графитированные волокна марки УК; (б, е) – карбонизованные и (г, з) – графитированные волокна марки Zoltek

Следует отметить, что высотные параметры шероховатости карбонизованных (рисунок 6, а') волокон марки УК составляют  $Sa = 45,3$  нм,  $Sz = 421,5$  нм, а графитированных (рисунок 6, б')  $Sa = 24,5$  нм,  $Sz = 222,9$  нм, то есть микрорельеф поверхности при термообработке  $T = 2800^{\circ}\text{C}$  уменьшается в 1,8 раза. При этом параметры шероховатости для карбонизованного (рисунок 6, в') волокна марки Zoltek составляют  $Sa = 31,9$  нм,  $Sz = 512,3$  нм, графитированного (рисунок 6, г')  $Sa = 22,3$  нм,  $Sz = 168,2$  нм, то есть микрорельеф поверхности снижается не так значительно, как для волокон марки УК.

Результатом экспериментальных исследований являются зависимости коэффициента трения  $\mu$  от нагрузки  $F$  и объемной температуры  $T$  (рисунок 7).

Анализ результатов показывает, что при комнатной температуре  $T = 23 \pm 3^\circ\text{C}$  с увеличением нормальной нагрузки наблюдается снижение коэффициента трения для обоих типов углеродных волокон, при этом трение на карбонизованных волокнах выше, чем на графитированных волокнах. Снижение коэффициента трения с

ростом нагрузки вызвано уменьшением влияния адгезионных сил в контакте перекрещивающихся волокон. Более интересным для практического применения является оценка коэффициента трения при температуре равной  $300^\circ\text{C}$  (полное испарение влаги). Анализ полученных данных (рисунок 7) показывает, что при температуре  $300^\circ\text{C}$  наблюдается значительное снижение коэффициента трения для углеродных волокон. Этот механизм можно объяснить снижением капиллярной адгезии.

Таким образом, во **второй главе** проведены исследования коэффициента трения углеродных жгутов из карбонизованных и графитированных углеродных волокон двух производителей (УК от ООО Аргон и Zoltek Panex 35 от Zoltek Inc.) по схеме контакта «перекрещивающиеся цилиндры» при двух объемных температурах  $T = 23$  и  $300^\circ\text{C}$  и двух нагрузках  $F = 0,2$  и  $1$  Н. Анализ проведенных трибологических экспериментов, показал:

- повышение температуры до  $300^\circ\text{C}$  приводит к уменьшению коэффициента трения (для карбонизованных волокон коэффициент трения уменьшается более, чем в два раза), что связано с уменьшением влияния сил капиллярной адгезии в области контактного взаимодействия;
- в выбранном диапазоне нагрузок ( $F = 0,2$  и  $1$  Н) коэффициент трения незначительно меняется с изменением нагрузки как при комнатной температуре ( $23^\circ\text{C}$ ), так и при повышенной температуре ( $300^\circ\text{C}$ );

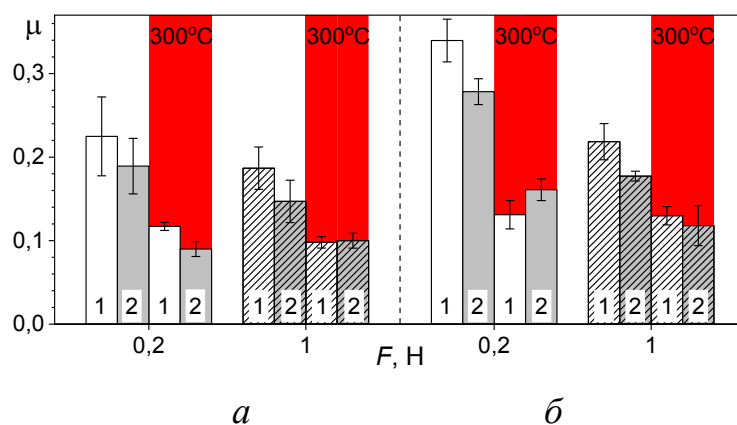


Рисунок 7. Зависимость коэффициента трения  $\mu$  от нагрузки  $F$  [Н] при двух температурах  $T = 23$  и  $300^\circ\text{C}$  для карбонизованных (1) и графитированных (2) волокон марок УК (а) и Zoltek (б)



- коэффициент трения карбонизованных углеродных волокон незначительно превышает значения коэффициента трения графитированных волокон при исследуемых нагрузках и температурах.

Исследование микрорельефа поверхности волокон до и после трибологических испытаний позволило сделать следующие выводы: поверхности карбонизованных волокон после трения практически не имеют следов разрушения, а на поверхности графитированных волокон обнаружено множество частиц износа разных форм и размеров.

**В третьей главе** представлены исследования коэффициента трения и интенсивности изнашивания углерод-углеродных композитных материалов различной структуры при высоких температурах, вызванных фрикционным разогревом в бескислородной среде.

Рассматривались четыре группы углерод-углеродных композитных материалов, изготовленные в виде колец диаметром наружным 28 мм, внутренним 20 мм и высотой 15 мм. Структура образцов первой (УУКМ1) и второй (УУКМ2) групп были описаны в **первой главе**. Третья группа (УУКМ3) была изготовлена на основе карбонизованного углеродного волокна длиной 6 мм, а также дополнительно армировалось межжгутовое пространство мелкодисперсной фракцией рубленных волокон. Четвертая группа (УУКМ4) была изготовлена из квазитрехмерной заготовки из карбонизованного углеродного волокна с последующим иглопробиванием слоев в перпендикулярном направлении. На рисунке 8 представлены СЭМ фотографии микроструктуры поверхности композитов перед трибологическими испытаниями для УУКМ3 (рисунок 8, *а*) и УУКМ4 (рисунок 8, *б*).

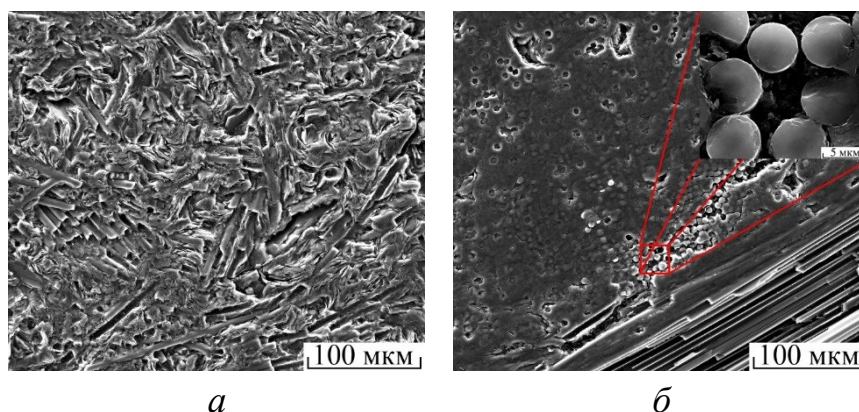


Рисунок 8. Микроскопия поверхности исследуемых образцов УУКМ3 (*а*), УУКМ4 (*б*)

Для первых двух групп образцов СЭМ изображения поверхности (рисунок 1, *а, в*) и их анализ представлены в **первой главе**. Анализ изображений показал, что у образца УУКМЗ (рисунок 8, *а*) поверхность трения состоит преимущественно из единичных волокон, которые хаотично распределены на поверхности трения, а для образца УУКМ4 (рисунок 8, *б*) наблюдаются исключительно пучки волокон в параллельном и перпендикулярном направлении к поверхности трения.

Экспериментальное исследование трибологических свойств проводилось на лабораторном трибометре УМТ-2 по схеме полного контакта ( $K_{\text{сз}} = 1$ ) кольцо-кольцо в диапазоне контактных давлений  $P = 0,5 \dots 1,1$  МПа ( $F = 143 \dots 316$  Н) и скоростей скольжения  $V = 1 \dots 4$  м/с ( $n = 795 \dots 3180$  об/мин). В процессе испытаний вследствие фрикционного разогрева происходило повышение температуры образцов, которая при максимальных значениях  $P$  и  $V$  достигала значений в  $1000^\circ\text{C}$ . При превышении температуры свыше  $400^\circ\text{C}$  происходит деградация углерода, связанная с окислением поверхности образцов, что приводит к их интенсивному износу (Чичинадзе А.В. и др., 2009). Для минимизации этого эффекта была произведена модернизация трибометра с целью изолирования испытываемых образцов от кислородной среды. Для этого лабораторный трибометр был дооснащен системой, обеспечивающей проведение испытаний в бескислородной среде (рисунок 9).

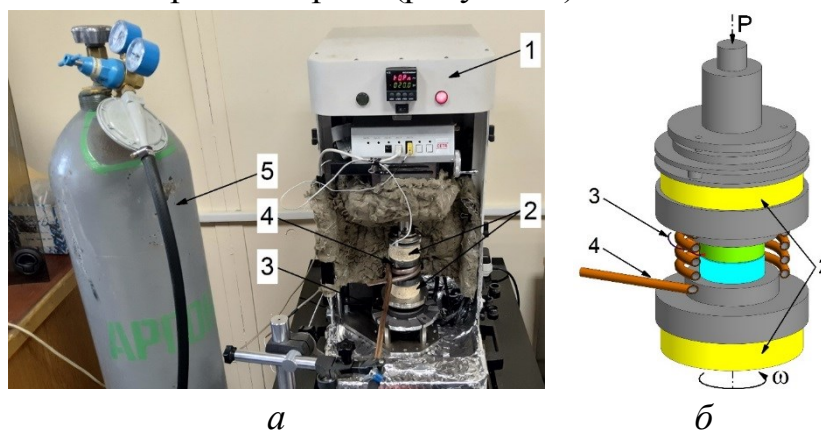


Рисунок 9. Фотография (*а*) и принципиальная схема (*б*) трибометра УМТ-2, где 1 – трибометр; 2 – теплоизоляторы; 3 – спираль для обдува пары трения; 4 – термопара; 5 – баллон с аргоном

В процессе эксперимента производился постоянный обдув пары трения инертным газом (аргоном), который поступает из баллона 5, через спираль 3. При помощи термопары 4 проводилось измерение температуры

неподвижного образца на расстоянии 1,5 мм от зоны трения. Для защиты измерительной части трибометра от воздействия высокой температуры были изготовлены термоизоляторы 2.

Трибологические испытания образцов проводились в соответствии с методикой двухфакторного планированного эксперимента. Полное описание методики ПФЭ представлено в **первой главе**. Искомую зависимость для коэффициента трения и интенсивности изнашивания (1), как и в первой главе, находили на основе серий экспериментов, в которых пределы изменения  $P$  и  $V$  задавали на двух уровнях. В таблице 2 представлены результаты кодирования нормальной нагрузки  $P$  и скорости скольжения  $V$ .

Таблица 2. Кодирование факторов

№ п/п	Уровень варьирования	Кодовое обозначение	$P$ , МПа ( $F$ , Н)		$V$ , м/с ( $n$ , об/мин)	
			$\chi_1$	$X_1$	$\chi_2$	$X_2$
1	Нижний	- 1	0,5 (143)	-1	1 (795)	-1
2	Верхний	+ 1	1,1 (316)	+1	4 (3180)	+1
3	Основной	0	0,8 (229)	0	2,5 (1988)	0
4	Полуинтервал	$\Delta\chi_i$	0,3 (87)	1	1,5 (1193)	1

При помощи метода Рамановской спектроскопии исследовалась молекулярная структура форм углерода, которая изменяется из-за воздействия высоких температур в процессе фрикционного разогрева. Раман спектры на образцах УУКМ были получены при помощи спектрометра inVia Reflex (Renishaw, Великобритания) с использованием возбуждающего зеленого лазера с длиной волны 532 нм.

В **разделе 3.2** приведены математические расчеты, основанные на регрессионном анализе экспериментальных данных на основе которых получены зависимости коэффициента трения (7), интенсивности изнашивания (8) и температуры в контакте (9) от нагрузочно-скоростных параметров.

$$\begin{aligned}
 \tilde{\mu}_{\text{УУКМ1}} &= -0,57 + 1,22P + 0,32V - 0,37PV, \\
 \tilde{\mu}_{\text{УУКМ2}} &= -0,48 + 1,21P + 0,25V - 0,33PV, \\
 \tilde{\mu}_{\text{УУКМ3}} &= -0,42 + 1,07P + 0,29V - 0,34PV, \\
 \tilde{\mu}_{\text{УУКМ4}} &= -0,33 + 1,05P + 0,24V - 0,32PV,
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{\text{УУКМ1}} &= -0,93 + 37,53P - 3,15V, \\ \tilde{I}_{\text{УУКМ2}} &= -26,06 + 54,77P + 6,76V - 9,02PV, \\ \tilde{I}_{\text{УУКМ3}} &= -2,54 + 27,98P, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{\text{УУКМ4}} &= -13,56 + 41,42P + 5,16V - 8,43PV, \\ \tilde{T}_{\text{УУКМ1}} &= -146 + 218P + 147V + 78PV, \\ \tilde{T}_{\text{УУКМ2}} &= -121 + 189P + 75V + 138PV, \\ \tilde{T}_{\text{УУКМ3}} &= -257 + 348P + 192V, \\ \tilde{T}_{\text{УУКМ4}} &= -73 + 162P + 103V + 69PV. \end{aligned} \quad (9)$$

Анализ (7) – (9) показывает, что коэффициент трения, интенсивность изнашивания и температура в контакте зависят как от нагрузки, так и от скорости скольжения. Для проведения дальнейшего анализа представим соотношения (7) – (9) в графическом виде. На рисунках 10 – 12 приведены изолинии коэффициента трения (рисунок 10), интенсивности изнашивания (рисунок 11) и температуры вблизи области контакта (рисунок 12) для композитов УУКМ1 (а), УУКМ2 (б), УУКМ3 (в) и УУКМ4 (г).

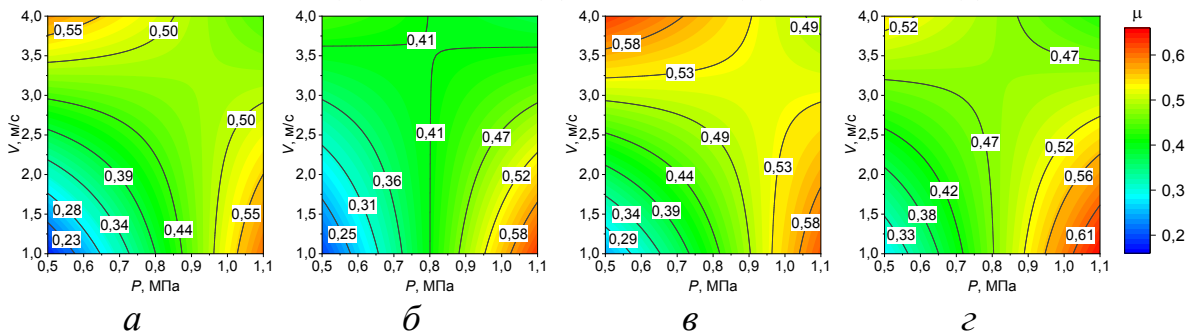


Рисунок 10. Изолинии коэффициента трения  $\mu$  от скорости скольжения и нормального давления, где УУКМ1 (а); УУКМ2 (б); УУКМ3 (в);

УУКМ4 (г)

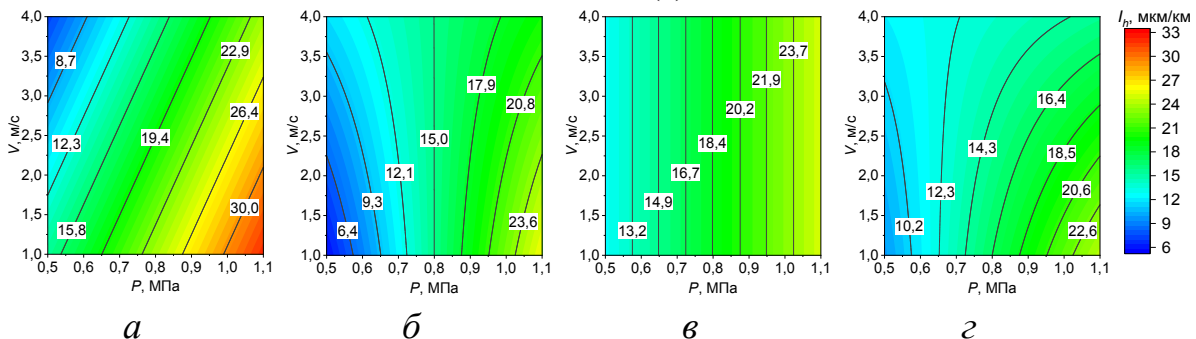


Рисунок 11. Изолинии коэффициента трения интенсивности изнашивания  $I_h$  [мкм/км] от скорости скольжения и нормального давления, где УУКМ1 (а); УУКМ2 (б); УУКМ3 (в); УУКМ4 (г)



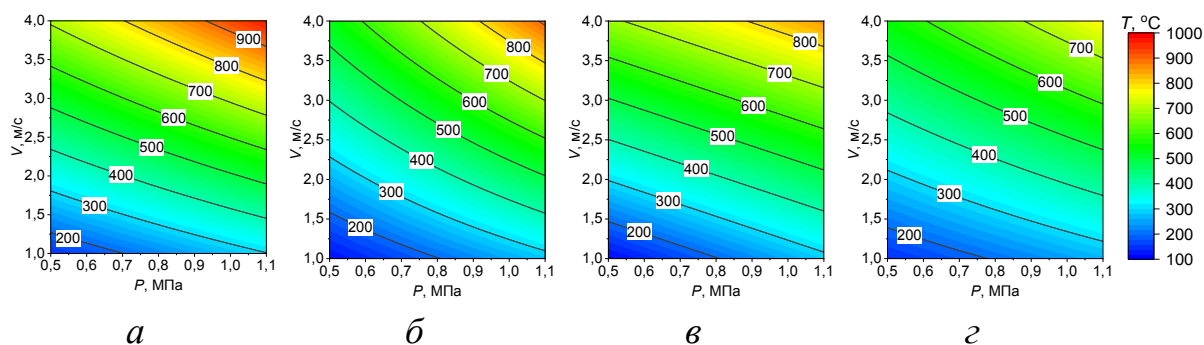


Рисунок 12. Изолинии температуры вблизи контакта  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] от скорости скольжения и нормального давления, где УУКМ1 (а); УУКМ2 (б); УУКМ3 (в); УУКМ4 (z)

Низкие значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания при минимальных значениях  $P$  и  $V$  объясняются низкой температурой композита ( $T < 130^{\circ}\text{C}$ ), которая не оказывает влияние на процесс испарения естественной влаги из материала. Среди исследуемых композитов материал УУКМ4 имеет самый низкий износ ( $I_h \approx 15$  мкм/км, см. рисунок 11, z), этот износ в 1,2 - 1,5 раз меньше, чем у других исследованных композитов на основе пековой матрицы. Значения коэффициента трения при максимальных значениях  $P$  и  $V$  для всех испытанных материалов близки друг к другу и лежат в диапазоне  $\mu = 0,38 \dots 0,48$ .

Максимальная температура была зафиксирована у УУКМ1 и была равна  $T \approx 1000^{\circ}\text{C}$  (см. рисунок 12, а), а самая низкая температура ( $T = 750^{\circ}\text{C}$ , см. рисунок 12, z) вблизи поверхности трения была зафиксирована у композита УУКМ4, что объясняется его дополнительным армированием в перпендикулярном к поверхности трения направлению.

Образование тонкой фрикционной пленки на поверхности трения, представляет собой процесс разрушения и преобразования частиц износа. С целью изучения структурного состояния пленки при помощи Раман спектроскопии были получены спектры на поверхности трения композита до и после его трибологических испытаний. Измеренные спектры исследованных образцов представлены на рисунке 13.

Можно отметить, что для образцов УУКМ1 и УУКМ2 Раман спектры пленки и матрицы близки, что свидетельствует об их схожей структуре. При этом для образцов УУКМ3 и УУКМ4 наблюдается сходство спектров между пленкой и волокном.

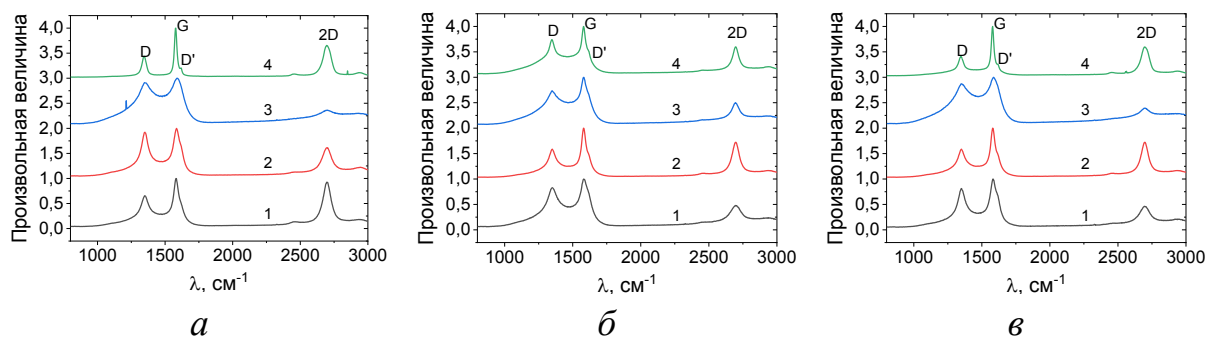


Рисунок 13. КРС спектры волокна (а), матрицы (б) и пленки трения (в) всех исследуемых композитов 1–4 соответственно

Таким образом, в третьей главе анализ рассчитанных математических зависимостей для исследуемых материалов позволил изучить влияние структуры композита на его трибологические характеристики. В частности, установлено:

- использование упорядоченной структуры композита с дополнительным армированием перпендикулярными волокнами (УУКМ4) приводит к увеличению износостойкости на 30-50% по сравнению с композитами, имеющими хаотично армированную структуру;
- дополнительное армирование межжгутового пространства (УУКМ3) мелкодисперсной фракцией углеродных волокон приводит к увеличению коэффициента трения и износостойкости;
- для всех материалов экспериментально установлено снижение коэффициента трения по мере увеличения нагрузочно-скоростных параметров.

В работе установлено: вследствие трения на поверхностях испытанных композитов образуется пленка трения, которая для УУКМ1 (на основе жгутов из графитированных волокон) и УУКМ2 (на основе жгутов из карбонизованных волокон) преимущественно состоит из частиц износа матрицы, а у УУКМ3 (на основе единичных коротких карбонизованных волокон) и УУКМ4 (на основе войлочного каркаса) в основном содержит углеродные волокна, что способствует уменьшению коэффициента трения.

Четвертая глава посвящена теоретико-экспериментальному исследованию контактно-усталостного механизма разрушения углерод-углеродных композитных материалов в условиях циклически меняющегося поля напряжения.

Экспериментальные исследования проводились на трех группах образцов. Первая (УУКМ1) и вторая (УУКМ2) группы образцов были изготовлены из УУКМ на основе дискретного графитированного волокна и отличались между собой длиной филаментов (длиной волокна) в готовом материале (20 и 0,5 мм, соответственно). Третья группа образцов (УУКМ3) была изготовлена из композита на основе карбонизованного волокна длиной 40 мм. Более подробное описание испытываемых композитов, их микроструктура и физико-механические свойства описаны в **первой главе**.

Экспериментальное исследование трибологических свойств материалов проводилось на трибометре фирмы CETR UMT-2, по схеме контакта стальной шарик-диск композита (рисунок 14). В качестве индентора был взят стальной шарик диаметром 14 мм. Испытания проводились при

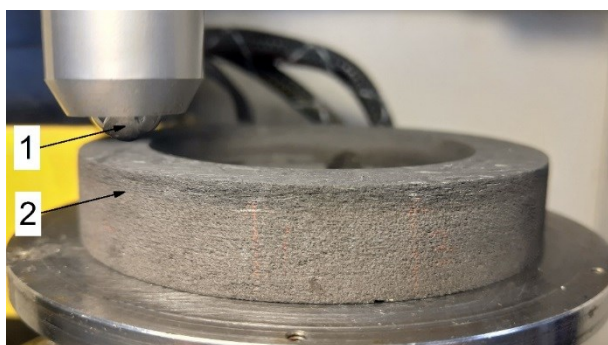


Рисунок 14. Испытание на изнашивание образца по схеме шарик-диск, где 1 – стальной шарик; 2 – кольцевой образец

комнатной температуре  $T = 23^{\circ}\text{C}$ , скорости скольжения  $V = 1$  м/с ( $n = 305$  об/мин) и нормальных нагрузках  $F$ , равных 50 и 100 Н.

Исследования глубины усталостных разрушений и рельефа разрушенной поверхности проводились на бесконтактном оптическом профилометре S Neox (SensoFar, Испания) с использованием конфокального объектива 20х.

В **разделе 4.2** приведены результаты экспериментов на контактно-усталостное разрушение углерод-углеродных композитных материалов различной структуры. Для всех исследуемых материалов происходит снижение коэффициента трения с увеличением нагрузки. Разрушение инициируется на некоторой глубине от поверхности примерно в середине дорожки трения. В результате циклического нагружения УУКМ происходит разрушение его поверхностных слоев, при этом с повышением нормальной нагрузки, приложенной к индентору, наблюдается увеличение глубины разрушения и уменьшение количества циклов до начала разрушения. Важно отметить, что процесс разрушения для всех исследуемых образцов наблюдался не сразу, а начинался после определенного количества циклов

нагружения, то есть имел место некоторый инкубационный период, указывающий на усталостный механизм разрушения.

Таким образом, из полученных экспериментальных результатов следует, что разрушение всех исследуемых образцов происходит по усталостному механизму, при этом глубина зарождения усталостных повреждений связана, прежде всего, с полем макронапряжений, возникающем в композите в условиях действующего циклического поля напряжений, инициируемого рассматриваемой схемой испытаний «стальной шарик–диск из УУКМ».

В разделе 4.3 рассматривается контактная задача для упругой сферы (1) радиуса  $R$ , скользящей по полупространству (2). К сфере приложена постоянная нагрузка  $P$ . На рисунке 15 показана схема контакта.

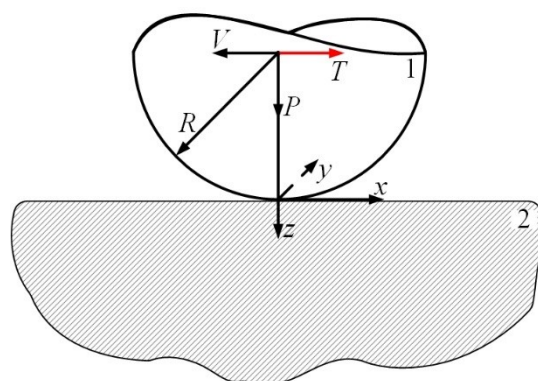


Рисунок 15. Схема скольжения сферы по хаотично армированному композитному материалу, где 1 – стальная сфера; 2 – композитный материал

Основными этапами моделирования накопления контактно-усталостных повреждений на макроуровне являются расчет осредненных модулей упругости композита и использование их для анализа распределения контактных и внутренних напряжений в композите, расчет функции поврежденности и определение расстояния от поверхности, на котором зарождается усталостная трещина.

Осредненный модуль упругости  $E$  для рассматриваемых волокнистых композитов определялся на основе соотношения (Фудзии Т. и Дзак М., 1982)  $E = \alpha E_B V_B + E_M V_M$  (правило смесей), в котором  $E_B, E_M, V_B, V_M$  – модули упругости и объемное содержание, соответственно, волокна (с индексом  $B$ ) и матрицы (с индексом  $M$ ), коэффициент  $\alpha$  зависит от характера упорядоченности расположения волокон в матрице, так для случайного расположения  $\alpha = 3/8$ .

При расчете контактных и внутренних напряжений в композите при его взаимодействии со сферическим жестким индентором композиты рассматривались как однородные материалы, механические свойства которых описываются осредненными модулями упругости. Распределение

давлений  $p(r)$  в области контакта  $r \leq a$  и размер области контакта  $a$  определялись по теории Герца (Джонсон К., 1985). Помимо давлений в области контакта действуют касательные напряжения  $|\tau(r)| = \mu p(r)$ , направленные противоположно направлению скорости скольжения.

По найденным распределениям контактных давлений и касательных напряжений рассчитывались компоненты тензора напряжений внутри рассматриваемого композита с использованием принципа суперпозиции и выражений для компонент тензора напряжений внутри упругого полупространства при действии на его поверхности в точке  $(0, 0, 0)$  сосредоточенной силы  $\sigma_z^0$ , направленной по нормали к поверхности полупространства, и сосредоточенной силы  $\tau_z^0$ , направленной по касательной к поверхности полупространства в направлении оси  $Ox$ .

В результате действия контактных нормальных и касательных напряжений в материале композита возникают внутренние напряжения, которые циклически меняются при движении индентора, вызывая накопление в материале усталостных повреждений.

В качестве критерия накопления усталостных повреждений на макроуровне была принята степенная зависимость скорости накопления повреждений  $q(z, P)$  (Горячева И.Г., 2001) от амплитудных значений  $\tau_{\max}(z, P)$  максимальных касательных напряжений на некоторой заданной глубине  $z$  при заданной нагрузке  $P$ , действующей на индентор, которые характеризуют максимальные сдвиговые напряжения в точке  $z$ :

$$q(z, P) = \left( \frac{\tau_{\max}(z, P)}{\tau_*} \right)^m. \quad (10)$$

В выражении (10)  $\tau_*$  есть некоторое нормирующее значение напряжения, а показатель степени  $m$  является характеристикой материала и определяется экспериментальным путем.

При неизменности распределения контактных напряжений в системе координат, связанной с индентором, и, соответственно, неизменном характере распределения максимальных касательных напряжений в композите, накопленная в материале поврежденность до начала разрушения прямо пропорциональна числу циклов нагружения  $N$  и определяется по формуле:

$$Q = Nq(z, P). \quad (11)$$

Критическая поврежденность  $Q^*$ , при которой в некоторой точке  $z^*$  под поверхностью происходит зарождение усталостной трещины, определяется количеством циклов  $N^*$  до разрушения материала.

Таким образом, для определения мест зарождения усталостной трещины в композите необходимо рассчитать распределение по глубине амплитудных значений максимальных касательных напряжений  $\tau_{\max}(z, P)$ , используя определенные по методике, изложенной в п. 4.3.2, распределения максимальных касательных напряжений в материале под индентором.

В разделе 4.4 приведен анализ распределения максимальных касательных напряжений и определения глубины залегания усталостной трещины и их сравнение с глубиной разрушения после экспериментальных исследований.

В таблице 3 приведены значения рассчитанной глубины залеганий усталостной трещины для каждого композита и полученной после проведения экспериментальных исследований и снятия профилограмм.

Таблица 3. Рассчитанные ( $\tilde{z}$ ) значения глубины залегания усталостной трещины и глубины разрушений после экспериментальных ( $\bar{z}$ ) исследований

Образец	Нагрузка $F = 50$ Н		Нагрузка $F = 100$ Н	
	$\tilde{z}$ , мкм	$\bar{z}$ , мкм	$\tilde{z}$ , мкм	$\bar{z}$ , мкм
УУКМ1	93	105±17	150	128±21
УУКМ2	83	83±18	143	117±22
УУКМ3	96	118±36	155	220±43

Сравнение рассчитанных значений глубин залегания усталостных трещин для рассматриваемых УУКМ при двух нагрузках, действующих на индентор, с результатами экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. При увеличении нагрузки как в расчетах, так и в экспериментах, наблюдается увеличение глубины залегания усталостной трещины.
2. Для УУКМ1 и УУКМ2 рассчитанные значения глубины возникновения усталостной трещины находятся внутри доверительного интервала экспериментально определенных значений глубин разрушения, полученных из анализа профилограмм разрушенной поверхности композита.
3. Для УУКМ3 при высокой нагрузке ( $F = 100$  Н) экспериментальные данные показывают большую глубину разрушения по сравнению с

расчетной величиной. Кроме того, для этого материала характерен большой доверительный интервал. Эти особенности разрушения композита объясняются его структурой: наличие длинных прочных волокон обуславливает их вырывание из более глубоких слоев материала, что приводит к неравномерному характеру разрушения и увеличению глубины разрушенного слоя.

Таким образом, в целом разрушение всех исследуемых видов композитов происходит в результате накопления усталостных повреждений в условиях циклически изменяющихся полей внутренних напряжений, определяемых действующими контактными напряжениями. При этом критерий максимальных касательных напряжений удовлетворительно описывает результаты экспериментов. Наблюдаемые незначительные расхождения расчетных и экспериментально определенных глубин разрушения поверхностных слоев рассмотренных в работе волокнистых композитов связаны с особенностями их структуры и прочностными характеристиками их структурных элементов.

Используя результаты проведенных экспериментов, можно определить показатель степени  $m$  в соотношении (10), что позволит прогнозировать начало разрушения рассматриваемых композитных материалов в условиях фрикционных испытаний при циклическом характере взаимодействия.

Учитывая, что критическое значение поврежденности  $Q^*$  есть характеристика конкретного материала, а также используя зарегистрированные в эксперименте значения количества циклов до разрушения  $N_1$  и  $N_2$  для двух различных нагрузок  $P_1$  и  $P_2$ , соответственно, из (10) и (11) получим:

$$\frac{N_1}{N_2} = \left( \frac{\tau_{\max}(z_2^*, P_2)}{\tau_{\max}(z_1^*, P_1)} \right)^m, \text{ откуда следует } m = \frac{\ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right)}{\ln\left(\frac{\tau_{\max}(z_2^*, P_2)}{\tau_{\max}(z_1^*, P_1)}\right)} \quad (12)$$

Используя зафиксированные в экспериментах значения числа циклов  $N_i$  до разрушения при нагрузках  $P_i$  ( $i = 1, 2$ ), действующих на конкретный композитный материал, а также результаты расчета максимальных касательных напряжений в рассматриваемых материалах по формуле (12) были получены следующие значения показателя для рассматриваемых композитов:

$$m_{УУКМ1} = 2,2684, m_{УУКМ2} = 5,1122, m_{УУКМ3} = 2,6558^* .$$

Результаты расчетов показали, что у материалов близкой структуры УУКМ1 и УУКМ3 показатели степени  $m_{УУКМ1}$  и  $m_{УУКМ3}$  в функции скорости накопления поврежденности (10) близки друг к другу и значительно отличаются от значения  $m_{УУКМ2}$ , полученного для материала УУКМ2, имеющего короткие волокна, хаотично расположенные в матрице. Стоит заметить, что у УУКМ3 при измерении глубины разрушения после экспериментов наблюдается большой доверительный интервал (см. таблицу 3), что может повлиять на достоверность полученного значения степени  $m_{УУКМ3}$ .

Таким образом, в **четвертой главе** предложен теоретико-экспериментальный метод расчета параметров функции поврежденности композитного материала на макроуровне. В частности, установлено:

- Снижение коэффициента трения с увеличением нагрузки для всех исследуемых углерод-углеродных композитных материалов.
- При увеличении нагрузки имело место увеличение глубины разрушения и уменьшение количества циклов до разрушения.
- В условиях циклического фрикционного нагружения композита после инкубационного периода наблюдалось разрушение подповерхностных слоев композита, что характерно для усталостного типа разрушения.
- Построена расчетная модель, основанная на анализе функции поврежденности материала на макроуровне. Проведены сравнения результатов моделирования и экспериментов, показывающие, что наиболее близкое совпадение расчетных и экспериментальных значений глубины залегания усталостной трещины находится у композита на основе коротких графитированных волокон (УУКМ2), обладающего относительно однородной структурой.

В **заключении** сформулированы **основные результаты** диссертационной работы.

**Основные результаты** настоящей диссертационной работы заключаются в следующем:

1. На основе проведенных экспериментальных исследований углерод-углеродных композитных материалов (УУКМ) установлено:



- на поверхности композитов в процессе трения образуется фрикционная пленка, которая в зависимости от структуры и температуры может состоять из частиц износа как матрицы, так и углеродных волокон;
  - сравнительный анализ значений коэффициента трения, полученных экспериментально в условиях одинаковых температур ( $T = 23^{\circ}\text{C}$ ), нагрузок ( $P = 0,5 \dots 22$  МПа) и скоростей скольжения ( $V = 0,03 \dots 4$  м/с) УУКМ на основе карбонизованных и графитированных волокон в одноименной паре трения показал, что композит на основе карбонизованных углеродных волокон имеет больший коэффициент трения;
  - фрикционные свойства (коэффициент трения и интенсивность изнашивания) УУКМ можно улучшить (повысить коэффициент трения и износостойкость) путем уменьшения шероховатости углеродных волокон;
  - дополнительное армирование межжгутового пространства мелкодисперсной фракцией углеродных волокон приводит к увеличению коэффициента трения по сравнению с неармированным материалом в исследуемом диапазоне температур ( $T = 150 \dots 1000^{\circ}\text{C}$ ), вызванных фрикционным разогревом, при сохранении высокой износостойкости УУКМ;
  - использование УУКМ с упорядоченной структурой и дополнительным армированием матрицы перпендикулярными волокнами приводит к увеличению износостойкости и улучшает теплопроводность в перпендикулярном направлении;
  - для хаотично армированных УУКМ наблюдается как абразивный, так и контактно-усталостный механизм разрушения подповерхностных слоев в условиях фрикционного взаимодействия.
2. Построена расчетная модель разрушения хаотично армированных УУКМ в условиях циклического нагружения, основанная на анализе функции поврежденности материала на макроуровне.
  3. Предложен теоретико-экспериментальный метод расчета параметров функции поврежденности для исследуемых композитов.

### Публикации автора 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 углерод-углеродных 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.
5. *Буковский П.О.* Сравнительная оценка трибологических свойств углерод-углеродных композиционных материалов // Научные труды VI Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». – 2019. – С. 81.
6. *Шпенев А.Г., Муравьева Т.И., Шкалей И.В., Буковский П.О.* Особенности эволюции микроструктуры углеродных композитов в процессе усталостного разрушения при изнашивании // Механические свойства современных конструкционных материалов. – 2020. – С. 112–113.
7. *Буковский П.О.* Сравнительная оценка трибологических свойств графитированных и карбонизованных углеродных волокон // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XV Всероссийской школы-конференции молодых ученых. – 2021. – С. 31–32.
8. *Буковский П.О., Горячева И.Г.* Контактное-усталостное разрушение волокнистых углеродных композитов: модели и эксперимент // Ломоносовские чтения. Научная конференция. Секция механики. Тезисы докладов. – 2021. – С. 42.

9. *Буковский П.О.* Экспериментальное исследование коэффициента трения и интенсивности изнашивания фрикционных углеродных композитов // Научные труды VII Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». – 2021. – С. 50–51.
10. *Горячева И.Г., Буковский П.О., Мещерякова А.Р.* Теоретико-экспериментальное изучение разрушения поверхностных слоев волокнистых композитов при фрикционном взаимодействии // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. Сборник трудов 11-й Всероссийской научной конференции с международным участием. – 2021. – С. 44.
11. *Буковский П.О.* Сравнительная оценка трибологических характеристик углеродных композитов в среде инертного газа // Труды 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ. – 2021. – С. 289–290.
12. *Буковский П.О., Горячева И.Г.* Моделирование и экспериментальное изучение разрушения поверхности углерод-углеродного композита при циклическом нагружении // Материалы XXVII Международного симпозиума Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред им. А.Г. Горшкова. – 2021. – Т. 2. – С. 24–26.
13. *Буковский П.О., Горячева И.Г.* Теоретико-экспериментальное изучение разрушения поверхности углеродных композитов при циклическом нагружении // Ломоносовские чтения. Научная конференция. Секция механики. Тезисы докладов. – 2022. – С. 41–42.
14. *Шкалей И.В., Буковский П.О.* Экспериментальное изучение трибологических характеристик углеродных композитов, изготовленных для авиационных тормозов // Всероссийская конференция молодых ученых-механиков YSM-2022. Тезисы докладов. – 2022. – С. 171.

БУКОВСКИЙ ПАВЕЛ ОЛЕГОВИЧ

**ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ  
ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ  
КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 2023 г. Заказ № \_\_\_\_\_  
Формат 60x90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Института проблем механики  
им А.Ю. Ишлинского РАН