

На правах рукописи

УДК 536.24:539.42:629.78:677.494:678.7

МИХАЙЛОВСКИЙ КОНСТАНТИН ВАЛЕРЬЕВИЧ

**МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИЙ С
ВЫСОКОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ИЗ
УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА
ОСНОВЕ МНОГОМАСШТАБНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук



Москва, 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Официальные
оппоненты:

Костин Владимир Алексеевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прочности конструкций, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ)

Страхов Валерий Леонидович

доктор технических наук, профессор, помощник генерального директора по науке, Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» (АО «ЦНИИСМ»)

Шайдурова Галина Ивановна

доктор технических наук, профессор, главный химик, Публичное акционерное общество «Научно-производственное объединение «Искра» (ПАО НПО «Искра»)

Ведущая
организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ)

Защита состоится «___» _____ 2026 г. в ___ часов ___ минут на заседании диссертационного совета 24.2.331.08 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный переулок, д. 10, факультет «Специальное машиностроение», ауд. 407.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просьба направить по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1. МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.08.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н., доцент



Луценко А.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Создание конструкций летательных аппаратов (ЛА) работоспособных в условиях тепловых, силовых, вибрационно-акустических, ударных нагрузок невозможно без применения современных композиционных материалов. Во многих случаях предпочтение отдается углеродсодержащим композиционным материалам (УКМ), состоящим из углеродного наполнителя (нити, ленты, ткани, объемные каркасы) и матрицы (полимерные, углерод-карбидокремниевые) с выраженной границей раздела между ними. УКМ в сравнении с металлами и керамикой имеют меньшую плотность, высокие удельные жесткостные и прочностные характеристики, низкие значения температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР), а также высокую термостойкость. Такие особенности, как анизотропия и зависимость характеристик от технологии производства также могут быть использованы для достижения лучших показателей качества конструкций. Кроме того, существует сильное различие механизмов разрушения матриц и наполнителей.

Вместе с тем, полностью реализовать преимущества УКМ для достижения функциональной эффективности конструкций пока не удастся из-за наличия разнообразных структурных дефектов, возникающих при производстве и эксплуатации. Многообразие факторов, вызывающих зарождение и развитие дефектов в УКМ различных видов, свидетельствует о сложности и междисциплинарности рассматриваемой проблемы. Для ее решения нельзя обойтись без применения современных инструментов исследования, включая математические модели, алгоритмы, средства структурной диагностики и контроля температурного и напряженно-деформированного состояния (НДС). Таким образом, **актуальна** разработка методологии, связывающей проектный облик конструкций из УКМ с появлением и развитием технологических и эксплуатационных дефектов на различных масштабных уровнях. Выявление природы таких дефектов, исследование их влияния на прочность, жесткость, ТКЛР и теплопроводность крайне важно для достижения необходимых характеристик конструкций из УКМ.

Автор выражает искреннюю благодарность заведующему кафедрой ракетно-космические композитные конструкции МГТУ им. Н.Э. Баумана док. техн. наук, профессору Резнику Сергею Васильевичу за деятельную помощь и полезные советы, относящиеся к постановке и обсуждению результатов работы.

Степень разработанности темы диссертации. В механику композитных конструкций заметный вклад внесли А.В. Азаров, Н.А. Алфутов, Н.С. Бахвалов, Г.А. Болотин, В.В. Васильев, Ю.И. Димитриенко, А.А. Дудченко, А.М. Думанский, В.Н. Зимин, П.А. Зиновьев, В.А. Комаров, В.А. Костин, С.А. Лурье, В.Е. Панин, Б.Е. Победря, А.Б. Миткевич, Ю.В. Немировский, Ю.Н. Работнов, А.Ф. Разин, А.А. Смердов, В.И. Усюкин, Е.Ф. Харченко и др.

Значимые исследования в области теплофизики КМ и тепловых режимов конструкций из КМ принадлежат О.М. Алифанову, Е.А. Артюхину,

В.В. Горскому, В.С. Зарубину, К.Б. Исаеву, А.В. Ненарокомову, П.В. Никитину, Ю.В. Полежаеву, П.В. Просунцову, С.В. Резнику, В.Л. Страхову, В.С. Финченко, В.Ф. Формалеву, О.Ф. Шленскому, В.М. Юдину и др.

Успехи в производстве конструкций из УКМ для ЛА связывают с именами В.А. Барынина, А.А. Берлина, Г.М. Гуняева, Е.Н. Каблова, О.Н. Комиссара, В.И. Костикова, А.А. Кулькова, В.Д. Протасова, А.Г. Ромашина, М.И. Соколовского, П.А. Стороженко, А.Н. Тимофеева, Е.Б. Тростянской, В.И. Халимановича, В.И. Халиулина, Г.И. Шайдуровой и др.

Несмотря на обилие работ в области УКМ решению, сформулированной выше проблемы, мешают: отсутствие надежных данных по степени анизотропии углеродных волокон в УКМ и адгезионной прочности на границах раздела; несовершенство моделей, прогнозирующих образование структурных дефектов и их эволюцию на разных масштабных уровнях в конструкциях из УКМ при изготовлении и эксплуатации; отсутствие общей теории, связывающей параметры технологических режимов производства конструкций с физико-механическими и теплофизическими характеристиками УКМ; недостаточный контроль и учет остаточных деформаций и напряжений в конструкциях из УКМ.

Решаемая в работе **научная проблема** – термopочность, функциональная эффективность конструкций из УКМ с прогнозируемыми характеристиками.

Объекты исследования – разнотипные УКМ и многоразовые, формo-размеростаbильные конструкции из таких материалов на стадиях изготовления и эксплуатации, в которых отсутствуют процессы термодеструкции и уноса.

Предмет исследования – взаимосвязанные нестационарные процессы тепломассообмена, химической кинетики, механики композитных сред и молекулярной динамики, порождающие дефекты разного масштабного уровня в конструкциях из УКМ.

Цель диссертационной работы – повышение функциональной эффективности, снижение продолжительности разработки конструкций летательных аппаратов из углеродсодержащих композиционных материалов с прогнозируемым уровнем физико-механических и теплофизических характеристик на основе многомасштабного математического моделирования.

Для достижения поставленной цели в работе намечено решение следующих **задач**:

1. Проанализировать современное состояние работ в области создания термopочных конструкций из УКМ.

2. Разработать методы многомасштабного математического моделирования для определения геометрических, функциональных параметров конструкций из УКМ с учетом внутренней структуры и накопленных в ней остаточных деформаций, напряжений с прогнозированием областей появления и развития дефектов при изготовлении и эксплуатации.

3. Выявить закономерности образования структурных дефектов с атомно-молекулярного до макроуровня и их эволюции в представительных элементах объема и конструкциях из УКМ при действии различного рода нагрузок.

4. Разработать физические и математические модели многомасштабных, нестационарных процессов тепломассообмена, химической кинетики, механики композитных сред при изготовлении разнотипных конструкций из УКМ для прогнозирования их физико-механических, теплофизических характеристик и выполнить верификацию, валидацию.

5. Построить систему измерения температур и контроля за формированием, накоплением остаточных деформаций, появлением трещин и их развитием в конструкциях из УКМ при изготовлении и эксплуатации.

6. Провести апробацию на модельных конструкциях из УКМ с учетом внутренней структуры, физико-химических процессов формирования матриц, образования и эволюции дефектов, остаточных деформаций, напряжений при изготовлении и эксплуатации для достижения высокой функциональной эффективности.

Научная новизна:

1. Впервые разработана методология гарантированного совершенства многоразовых конструкций из УКМ на основе многомасштабного математического моделирования взаимосвязанных нестационарных процессов тепломассообмена, химической кинетики, механики композитных сред и молекулярной динамики, которая учитывает связи структурных уровней, характеристики наполнителей, матриц, схемы армирования, накопленные остаточные деформации и напряжения, области появления и развития дефектов при изготовлении и эксплуатации.

2. Определена степень анизотропии углеродных волокон разных марок (УКН-М-6К, UMT42S-3К, UMT49S-12К, UMT430-12К, ГЖ-23), сформулированы критерии прочности и феноменологические модели их разрушения под нагрузкой, установлены величины адгезионной прочности на границах раздела с различными типами матриц (эпоксидные, цианат-эфирная, полиэфирэфиркетон, углерод-карбидокремниевая) и влияния дефектов с помощью многомасштабного математического моделирования компонентов и УКМ. Выявлены закономерности влияния на характеристики УКМ структурных дефектов с атомно-молекулярного до макроуровня и их эволюции при действии различного рода нагрузок.

3. Впервые определены взаимосвязи стадий получения конструкций из УКМ с их функциональными характеристиками на основе многомасштабного математического моделирования процессов тепломассообмена, химической кинетики, механики композитных сред с учетом реальной структуры, эволюции пористого пространства, остаточных деформаций, напряжений и дефектов разного уровня.

4. Предложено новое семейство многомасштабных математических моделей, совокупность технических решений для повышения функциональной эффективности конструкций из УКМ с контролем температур, остаточных деформаций и напряжений, фиксацией образования и развития трещин при изготовлении и эксплуатации.

Практическая значимость:

1. Созданы цифровые двойники разнотипных модельных конструкций из УКМ с учетом накопленных остаточных деформаций, напряжений, вероятных дефектов внутренней структуры при изготовлении, которые являются основой для достижения функциональной эффективности, способствуют снижению продолжительности этапов проектирования.

2. Установлена возможность повышения функциональных характеристик разнотипных модельных конструкций из УКМ по сравнению с существующими аналогами.

3. Предложена и апробирована в ходе натурных испытаний система измерения температур, контроля за формированием, накоплением остаточных деформаций, появлением трещин и их развитием в конструкциях из УКМ при изготовлении и эксплуатации. Благодаря включению в состав системы датчиков с решетками Брэгга достигнута возможность контроля деформаций с точностью 10^{-6} , температур – 0,01 град.

4. Разработаны алгоритмы выбора и построения представительных элементов объема УКМ с разной технологической завершенностью на основе многомасштабного моделирования физико-химических процессов изготовления и экспериментальных исследований внутренней структуры разнотипных конструкций.

5. По результатам расчетно-теоретических исследований определены физико-механические, динамические, термомеханические, теплофизические характеристики и термостойкость УКМ в диапазоне температур.

Отдельные результаты получены в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014 – 2020 годы»: соглашения о предоставлении субсидии №14.577.21.0099, №14.577.21.0114, №14.574.21.0146; по гранту Президента РФ МК-6573.2013.3.

Внедрение результатов. Результаты работы внедрены в АО «Решетнев» (акт внедрения от 18.09.2024 г.), АО «РКЦ «Прогресс» (акт внедрения от 01.10.2024 г.), АО «НПО Энергомаш» (акт внедрения от 02.09.2024 г.) при проектировании и создании конструкций из УКМ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методология гарантированного совершенства многофазовых конструкций из УКМ на основе многомасштабного математического моделирования взаимосвязанных нестационарных процессов теплообмена, химической кинетики, механики композитных сред и молекулярной динамики, которая учитывает связи структурных уровней, характеристики наполнителей, матриц, схемы армирования, накопленные остаточные деформации и напряжения, области появления и развития дефектов при изготовлении и эксплуатации.

2. Степень анизотропии углеродных волокон разных марок (УКН-М-6К, UMT42S-3K, UMT49S-12K, UMT430-12K, ГЖ-23), критерии прочности и феноменологические модели их разрушения под нагрузкой, величины

адгезионной прочности на границах раздела с различными типами матриц (эпоксидные, цианат-эфирная, полиэфирэфиркетон, углерод-карбидокремниевая) и влияния дефектов, которые определены с помощью многомасштабного математического моделирования компонентов и УКМ. Закономерности влияния на характеристики УКМ структурных дефектов с атомно-молекулярного до макроуровня и их эволюции при действии различного рода нагрузок.

3. Взаимосвязи компоновок в опытно-промышленных установках при формировании матриц конструкций из УКМ с их функциональными характеристиками на основе многомасштабного математического моделирования процессов тепломассообмена, химической кинетики, механики композитных сред с учетом реальной структуры, эволюции пористого пространства, остаточных деформаций, напряжений и дефектов разного уровня.

4. Семейство многомасштабных математических моделей, совокупность технических решений для повышения функциональной эффективности конструкций из УКМ с контролем температур, остаточных деформаций и напряжений, фиксацией образования и развития трещин при изготовлении и эксплуатации. Благодаря включению в состав системы датчиков с решетками Брэгга достигнута возможность контроля деформаций с точностью 10^{-6} , температур – 0,01 град.

5. Цифровые двойники разнотипных модельных конструкций из УКМ с учетом накопленных остаточных деформаций, напряжений, вероятных дефектов внутренней структуры при изготовлении, которые являются основой для достижения функциональной эффективности, способствуют снижению продолжительности этапов проектирования и производства.

Методы исследования. Разработанная методология опирается на фундаментальные физические законы, модели взаимосвязанных процессов тепломассообмена в нестационарной постановке, молекулярной динамики, химической кинетики, механики композитных сред и теории эволюции структурных дефектов, трещин в гетерогенных средах, методы оценки интенсивности высвобождения энергии при раскрытии трещин в деформируемых материалах, теории адгезионного слоя, численные методы математического моделирования и метод определения деформаций с помощью решеток Брэгга.

Достоверность и обоснованность результатов гарантируется корректностью выбора исходных математических моделей, допущений и ограничений при постановке задач на четырех масштабных уровнях, применением современного математического аппарата численного моделирования, хорошим согласием теоретических данных с результатами экспериментальных исследований, использованием высокоточных поверенных средств контроля и измерения параметров, проведением испытаний и исследований на сертифицированных испытательных машинах и приборах, использованием высокоточных оптоволоконных датчиков (ОВД) с решетками Брэгга.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались и обсуждались на ряде всероссийских и международных конференций: III, V Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва, 2009, 2011; XXXIV, XXXIX, XL, XLIII – XLVII Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. Москва, 2010, 2015, 2016, 2019 – 2023; VI Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике». Москва, 2011; XVIII, XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. Алушта, 2013, 2015; 1-ой Международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций». Москва, 2014; 4-ой Международной конференции Advanced Composites and Materials Technologies for Arduous Applications. United Kingdom, Wrexham, 2015; Международной конференции Thermophysical Basis of Energy Technologies. Томск, 2016; XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. Алушта, 2016; VII Международной конференции с элементами научной школы «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества». Суздаль, 2018; XII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли. Алушта, 2018; Международной конференции Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment. Томск, 2018; Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении». Севастополь, 2018; XXII Международной научно-технической конференции «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов». Обнинск, 2019; I – III, V, VI Международном научном симпозиуме «Технологии аэрокосмической техники». Севастополь, 2019 – 2021, 2023, 2024; Международной конференции Advanced Materials and Demanding Applications. United Kingdom, Wrexham, 2020 и др.

Личный вклад состоит в разработке методологии, методов многомасштабного математического моделирования температурного и напряженно-деформированного состояния конструкций из УКМ, разрушения компонентов и УКМ, в определении рациональных параметров конструкций из УКМ с заданным уровнем характеристик, внедрением в практику производства расчетно-экспериментальных методов повышения функциональных характеристик конструкций из УКМ с контролем температур и накоплением остаточных деформаций, напряжений, образованием трещин и их развитием при изготовлении и эксплуатации с помощью новых средств диагностики. Разработан алгоритм выбора и построения представительных элементов объема (ПЭО) УКМ, созданы цифровые двойники и установлена возможность повышения функциональных характеристик разнотипных модельных конструкций из УКМ. Все основные результаты получены лично автором.

Публикации. Основные положения и результаты отражены в 101 научной работе (общий объем 39,1 п.л. / 18,9 п.л.), в том числе в журналах из перечня, рекомендованных ВАК РФ – 31, из которых 20 статей в журналах по специальности 2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов и 14 из базы данных Scopus и Web of Science.

Предложенные конструктивно-технологические решения защищены 6 патентами на полезные модели.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 442 страницах, состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы из 432 наименований, приложения, 262 рисунков и 31 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введение обоснована актуальность работы, отражена степень разработанности темы диссертации, а также выделены вопросы, препятствующие полноценной реализации преимуществ УКМ для создания конструкций с высокой функциональной эффективностью. Сформулированы цель и задачи работы, определены научная новизна и практическая значимость. Изложены положения, выносимые на защиту, и структура диссертации.

В Главе 1 представлен анализ современного состояния работ по созданию конструкций из УКМ для аэрокосмической техники, приведена классификация УКМ. Систематизированы исследования в области определения адгезионной прочности углеродных волокон к разным типам матриц в УКМ, а также изучения анизотропии и характеристик. Проанализированы условия эксплуатации конструкций из УКМ. Показаны преимущества использования ОВД с решетками Брэгга при изучении остаточных деформаций, напряжений в конструкциях из УКМ. Отмечена необходимость определения параметров конструкций из УКМ на основе многомасштабных математических моделей. Сформулированы основные положения предлагаемой методологии и этапы ее последовательного применения.

Глава 2 посвящена методам многомасштабного математического моделирования температурного и напряженно-деформированного состояния, разрушения компонентов УКМ в конструкциях. Для построения взаимосвязей введены масштабные уровни: атомно-молекулярный, микро-, мезо- и макроуровень. Моделирование УКМ на атомно-молекулярном уровне, даже при введении искажений структурной ячейки, дислокаций, неоднородностей приводит к завышенным данным по характеристикам. Это различие с экспериментальными данными, полученными на образцах материала на микро и мезоуровне, обусловлено наличием дефектов, пор, а также масштабного фактора.

Необходимо выделить уровень УКМ, который одновременно можно рассматривать и для верификации, валидации математических моделей, а также взаимосвязи разных масштабов. Микроуровень УКМ удовлетворяет данным требованиям и позволяет решить ряд задач: определение степени анизотропии

углеродных волокон и разброса геометрических параметров, характеристик; изучение механизмов разрушения, влияния поверхностных микротрещин; определение адгезии углеродных волокон к различным матрицам.

В настоящей работе для определения разброса геометрических параметров и характеристик вдоль оси волокон изучены следующие углеродные нити, которые серийно изготавливаются отечественными предприятиями: высокопрочные УКН-М-6К, UMT42S-3К, UMT49S-12К; модульные ГЖ-23, UMT430-12К.

Верификация и валидация моделей на микроуровне УКМ потребовала детального исследования поверхности и формы углеродных волокон для построения ПЭО с реальной структурой. С помощью растровых электронных микроскопов, атомно-силового микроскопа и энерго-дисперсионного рентгеновского микроанализатора установлена характерная форма сечений, состав, рельеф поверхности и разброс по эквивалентным диаметрам рассматриваемых углеродных волокон. Установлено, что коэффициент вариации диаметров углеродных волокон может составлять: 6,1 % для нити УКН-М-6К; 7,4 % для нити UMT42S-3К; 9,3 % для нити UMT49S-12К; 11,7 % для нити ГЖ-23; 9,9 % для нити UMT430-12К.

Предел прочности, модуль упругости и относительное удлинение углеродных волокон из разных марок нитей измерялись в соответствии с ГОСТ 32667. При выборе с использованием увеличительного стекла отобраны образцы углеродных волокон в количестве 40 шт. из каждой партии нити. Волокна с помощью эпоксидного клея холодного отверждения ВК-9 наклеивались на рамку из плотной бумаги толщиной 0,1 мм с прорезью. Далее проводились испытания на разрывной машине с применением пружинно-винтового захвата с центрирующими элементами.

Определены прочностные (σ – предел прочности при растяжении), жесткостные характеристики вдоль оси углеродных волокон и их разброс. После обработки экспериментальных данных получены зависимости интегральной вероятности разрушения для углеродных волокон разных марок, которые применялись для моделирования появления и развития микротрещин:

$$\begin{aligned}
 & - \text{УКН-М-6К: } G(\sigma) = 1 - \exp\left(-1,8 \left(\frac{\sigma}{3,958}\right)^{7,64}\right); \\
 & - \text{UMT42S-3К: } G(\sigma) = 1 - \exp\left(-1,8 \left(\frac{\sigma}{4,569}\right)^{10,49}\right); \\
 & - \text{UMT49S-12К: } G(\sigma) = 1 - \exp\left(-1,8 \left(\frac{\sigma}{5,389}\right)^{9,04}\right); \\
 & - \text{ГЖ-23: } G(\sigma) = 1 - \exp\left(-1,8 \left(\frac{\sigma}{3,259}\right)^{7,66}\right); \\
 & - \text{UMT430-12К: } G(\sigma) = 1 - \exp\left(-1,8 \left(\frac{\sigma}{4,309}\right)^{8,66}\right).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Следующим этапом осуществлялось математическое моделирование механических испытаний углеродных волокон для: определения поперечного модуля упругости и уточнения экспериментальных данных; установления влияния размеров поверхностных микротрещин на характер разрушения и

прочность углеродных волокон; определения трещиностойкости углеродных волокон различных марок при статических и циклических нагрузках.

Построены геометрические модели углеродных волокон с действительной формой сечения, установленной по результатам структурных исследований и анализа. Далее с помощью пользовательского языка программирования в ANSYS для каждого конечного элемента при нестационарном, нелинейном моделировании в трехмерной постановке реализованы математические зависимости интегральной вероятности разрушения углеродных волокон разных марок (1). При достижении вероятности разрушения 1 автоматически происходило удаление элемента и перераспределение деформаций, напряжений.

Валидация численной модели, конечно-элементной сетки и исходных данных по физико-механическим характеристикам каждой марки углеродного волокна проводилась путем сопоставления экспериментальных и расчетных данных. При этом допускалось различие измеренных и расчетных значений перемещений не более 2 %. Отдельные результаты математического моделирования прогнозирования возникновения и развития микротрещин в углеродных волокнах разных марок с реальной формой сечения приведены на Рисунке 1. Показано, что при моделировании испытаний в углеродных волокнах возникали поверхностные дефекты – микротрещины с минимальным размером 0,04 мкм, которые, соединяясь между собой, образовывали микротрещины, уходящие внутрь структуры и приводящие к разрыву.

Дальнейшее снижение размера конечного элемента нерационально из-за значительного повышения длительности вычислений и других механизмов разрушения. Результаты математического моделирования появления и эволюции микротрещин, характер разрушения хорошо соответствовали данным микроструктурных исследований волокон после испытаний. Последующий замысел исследований заключался в применении разработанных моделей для прогнозирования характера разрушения углеродных волокон разных марок и определения предела прочности при испытании на сжатие.

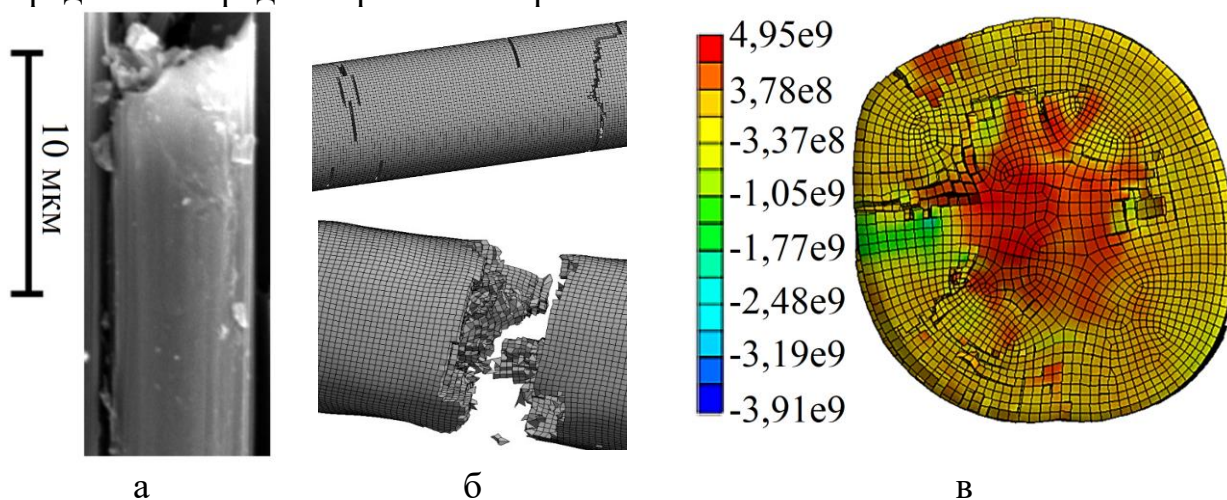


Рисунок 1. Углеродное волокно UMT49S-12K: а – микроструктура области разрыва; б – области разрушений и разрыва волокна при моделировании испытаний на растяжение; в – нормальные напряжения вдоль оси волокна в сечении в районе сквозной микротрещины, Па

Осуществить такие эксперименты на образцах на серийных разрывных машинах невозможно из-за отсутствия методик и специальных захватов. При выборе длины геометрических моделей углеродных волокон исключалась потеря устойчивости, чтобы не вносить значительную погрешность в определение предела прочности на сжатие при численном моделировании испытаний. Установлено, что при моделировании испытаний в углеродных волокнах формировался характерный излом с образованием сквозных микротрещин и разрушением. Построены диаграммы зависимости напряжений от деформаций, которые позволили установить расчетные значения пределов прочности при сжатии углеродных волокон разных марок с реальной формой сечения. Определена степень анизотропии, которая, в зависимости от марки, составила от 17,1 до 28,5 и построены критерии прочности.

Условия раскрытия микротрещин для углеродных волокон пока мало изучены. Ранее данная задача рассматривалась в упрощенной постановке без учета реальной формы сечения волокна и возможности образования соседних дефектов, микротрещин и их соединения с последующим разрывом волокна, динамики раскрытия микротрещины и разрушения волокна. В настоящей работе исследовано раскрытие микротрещин в углеродных волокнах разных марок с учетом перечисленных выше факторов. Размеры начальной микротрещины определены при микроструктурных исследованиях поверхности углеродных волокон. Выбраны следующие размеры: длина микротрещины 4,2 мкм; глубина 1,0 мкм; высота 0,85 мкм (исследованы и микротрещины, начиная со следующих размеров: длина 0,5 мкм; глубина трещины 0,1 мкм; высота 0,06 мкм).

Установлено изменение коэффициентов интенсивности напряжений в углеродных волокнах разных марок при эволюции микротрещин вдоль фронта распространения, а также изучено влияние их различного расположения на характер разрушения. Показано, что наличие поверхностных микротрещин в одной плоскости приводило к формированию области взаимного распространения фронтов навстречу друг к другу, причем чем больше глубина залегания, тем быстрее происходил рост. Фронт микротрещин распространялся быстрее в центральной области до момента соединения и разрыва углеродных волокон. Расположение поверхностных микротрещин в различных параллельных плоскостях на расстоянии до 0,9 мкм приводило к тому, что фронты роста стремились к кратчайшему расстоянию до момента соединения и полного разрыва углеродных волокон. Увеличение расстояния от 1 до 2,5 мкм вызывало образование значительных изломов и формирование сложной фрагментированной области разрушения углеродных волокон. Расположение поверхностных микротрещин на расстоянии от 2,6 мкм и более приводило к эволюционированию фронтов роста микротрещин с незначительным взаимным влиянием, причем разрывы и разрушения углеродных волокон происходили в области с наибольшей первоначальной глубиной залегания дефектов.

Для определения усталостной прочности углеродных волокон разных марок при наличии поверхностного дефекта – микротрещины применялись геометрические модели с реальной формой сечения. Геометрические модели

имели длину эквивалентную 5 диаметрам углеродного волокна. Численное моделирование раскрытия микротрещины при циклическом испытании на растяжение углеродных волокон разных марок осуществлялось в трехмерной постановке и приложение нагрузки соответствовало схеме испытаний. Изучение механизма разрушения углеродных волокон показало, что для ГЖ-23, УМТ430-12К происходит интенсивное развитие первичных микроструктурных дефектов – микротрещин при нагрузках равных 61 % от разрушающей, а для УКН-М-6К, УМТ42S-3К, УМТ49S-12К от 82 %, что связано с различными жесткостными характеристиками.

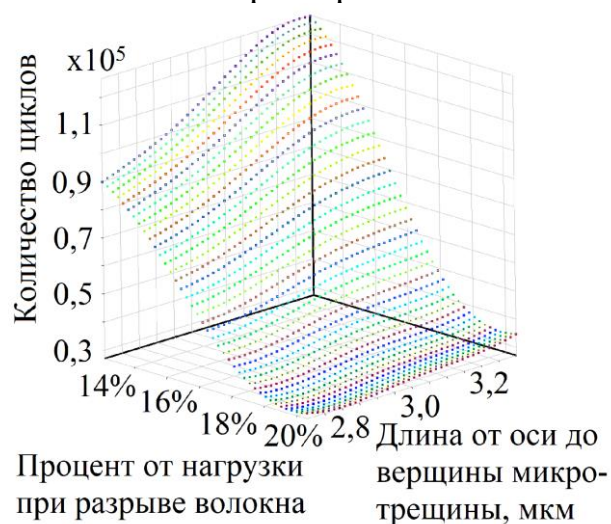


Рисунок 2. Зависимость количества циклов до разрушения от нагрузки и размера микротрещины на примере волокна УМТ42S-3К при циклическом испытании на растяжение

Изучено раскрытие первичных микротрещин разных размеров при действии циклических нагрузок. Диапазон размеров микротрещин для углеродных волокон разных марок лежал в интервалах: длина от 2,0 до 4,2 мкм (для эллиптических микротрещин от 0,02 до 1,0 мкм), глубина залегания от 0,3 до 1,0 мкм, высота от 0,06 до 0,85 мкм.

Рассматривались две микротрещины, расположенные в одной плоскости и в разных на расстоянии до одного диаметра углеродного волокна, и другой формы вдоль оси волокна. Получены зависимости (Рисунок 2) количества циклов нагружения до разрушения и

скорости роста микротрещины от циклической нагрузки и характерных размеров начальной микротрещины.

Теплофизика углеродных волокон изучена с учетом развития дефектов. Были проведены экспериментальные исследования коэффициента теплопроводности углеродных волокон вдоль оси и удельной теплоемкости, а также математическое моделирование для прогнозирования коэффициентов теплопроводности перпендикулярно оси. Первоначально коэффициенты теплопроводности углеродных волокон вдоль оси измерены с использованием метода лазерного импульса. Определено, что теплопроводность углеродных волокон в осевом направлении составляет: для УКН-М-6К – 8,1 Вт/(м·К); УМТ42S-3К – 9,6 Вт/(м·К); УМТ49S-12К – 9,2 Вт/(м·К); ГЖ-23 – 85,4 Вт/(м·К); УМТ430-12К – 73,1 Вт/(м·К). Теплоемкость углеродных волокон исследовалась с использованием метода дифференциальной сканирующей калориметрии в инертной атмосфере.

Для прогнозирования коэффициентов теплопроводности углеродных волокон перпендикулярно оси проведено численное моделирование для образцов однонаправленных УКМ с полимерными матрицами. УКМ с углерод-

карбидокремниевыми матрицами из-за более развитой пористой структуры давали большую погрешность определения свойств. Геометрические модели ПЭО однонаправленного УКМ с полимерными матрицами учитывали реальные параметры углеродных волокон в зависимости от марки, распределение их в объеме по данным микроструктурных исследований, а также остаточную пористость. Пористая структура представлялась в виде набора эллипсоидов разных размеров, определенных по данным структурных исследований. Исследовано влияние искривления углеродных волокон до 3° (данная величина установлена при микроструктурных исследованиях) в ПЭО на расчетные значения коэффициентов теплопроводности.

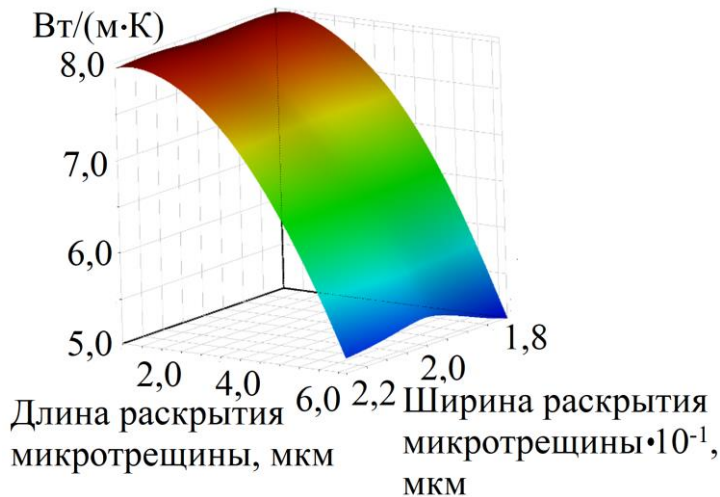


Рисунок 3. Изменение теплопроводности в осевом направлении волокна УКН-М-6К от длины и ширины раскрытия микротрещины, Вт/(м·К)

Учет искривления волокон в ПЭО до 3° влияет на расчетные значения поперечных коэффициентов теплопроводности углеродных волокон в пределах от 0,4 % до 2,1 % в зависимости от марки. Изучена значимость тепловых эффектов при раскрытии микротрещин в углеродных волокнах разных марок, а также их влияние на продольный коэффициент теплопроводности (Рисунок 3). Показано, что возможно снижение более, чем на 38 %.

В настоящей работе изучены углеродные волокна и матрицы УКМ на атомно-молекулярном уровне, что позволило создать общую иерархию структурных уровней, установить влияние неоднородностей на особенности поведения при нагружении, формирования областей появления и развития трещин с размерами от долей до нескольких нанометров. Принимались во внимание степень образования гексагональных плоскостей с ковалентными связями атомов углерода, искажение решеток и наличие не связанных атомов, пор. Данный уровень необходим для решения следующих задач: изучения влияния структурной неоднородности углеродных волокон, матриц на свойства, особенности деформирования, разрушения на атомно-молекулярном уровне; оценки сил взаимодействия на границе раздела «волокно – матрица» и адгезионной прочности.

Для прогнозирования жесткостных характеристик углеродных волокон, матриц УКМ на атомно-молекулярном уровне использовалось уравнение молекулярной динамики:

$$\Psi_A = \frac{1}{\Omega_A} \cdot \left(\left[\sum_{i_{CB}=1}^{N_{CB}} m_{i_{CB}} \cdot ((v_{i_{CB}}) \cdot (v_{i_{CB}})^T) \right] + \left[\sum_{j_{CB} > i_{CB}}^{N_{CB}} r_{i_{CB}j_{CB}} \cdot (F_{i_{CB}j_{CB}})^T \right] \right), \quad (2)$$

где: Ψ_A – тензор внутренних напряжений в рассматриваемой системе, Па; Ω_A – объем представительного элемента на атомно-молекулярном уровне в исходном состоянии без приложения граничных условий, м³; $N_{св}$ – количество атомов в ПЭО; $m_{i_{св}}$ – масса атомов в ПЭО, кг; $v_{i_{св}}$ – скорость движения атомов, м/с; $r_{i_{св}j_{св}}$ – радиус векторы для каждого атома, определяющие его положение и взаимодействие с соседними, м; $F_{i_{св}j_{св}}$ – силы межатомного взаимодействия, Н.

Далее рассчитывались коэффициенты матрицы жесткости:

$$C_{lmnk} = \frac{\partial \Psi_{Alm}}{\partial \varepsilon_{Ank}} \bigg|_{T, u_{Ank}} = \frac{1}{\Omega_A} \cdot \frac{\partial^2 H_A}{\partial \varepsilon_{Alm} \partial \varepsilon_{Ank}} \bigg|_{T, u_{Ank}, u_{Alm}}, \quad (3)$$

где: T – температура системы, К; u_{Ank} – исходные параметры по координатам атомов; H_A – энергия Гельмгольца.

Связь между тензором напряжений и деформаций определялась через обобщенный закон Гука, с учетом малых деформаций:

$$\Psi_{Alm} = [C_{lmnk}] \cdot \varepsilon_{Ank}. \quad (4)$$

Используя уравнения (2) – (4) и периодические граничные условия, а также задавая перемещения в соответствующих направлениях для ПЭО, определялись модули упругости, коэффициенты Пуассона. В качестве внешнего воздействия и ограничений на систему были приложены: гравитационное поле, симметричные граничные условия для ячейки, перемещения группы атомов на границе в зависимости от условий нагружения на микроуровне.

В рамках предложенного выше подхода построены атомно-молекулярные модели углеродных волокон разных марок УКН-М-6К, УМТ42S-3К, УМТ49S-12К, ГЖ-23, УМТ430-12К. Количество и виды атомов, содержащихся в углеродных волокнах, выбраны из исходной молекулярной составляющей ПАН-волокна и технологии изготовления, а также с учетом результатов элементного анализа и данных спектроскопии. Атомно-молекулярные модели матриц УКМ строились по результатам рентгенофазового, элементного анализа. В моделях учтено наличие нанопор в структуре, искажение гексагональных решеток, присутствие не связанных атомов, обусловленных технологией изготовления (Рисунок 4).

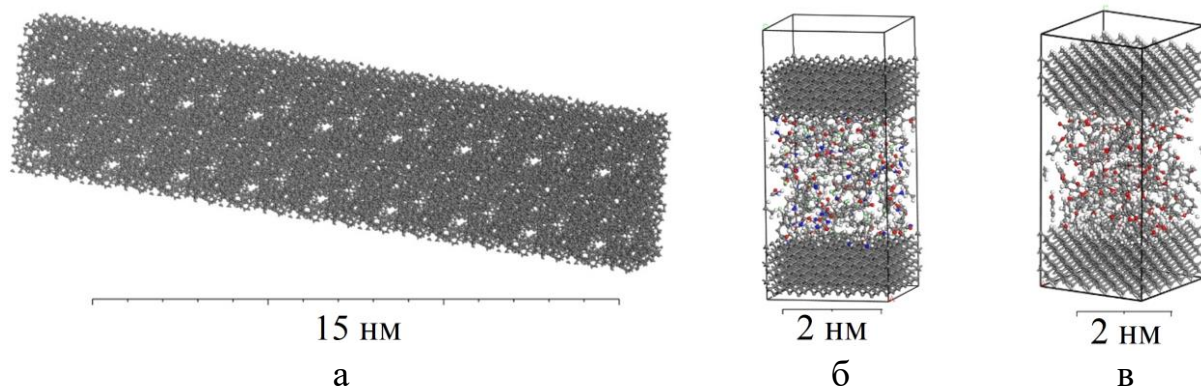


Рисунок 4. Модели структур компонентов УКМ: а – углеродное волокно УМТ42S-3К; б, в – матрица эпоксидная и полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), соответственно, у границ углеродного волокна УМТ49S-12К

Показано, что в структуре углеродных волокон имеются разрывы, поры, искажения, отклонения от расположения вдоль оси гексагональных кристаллических решеток. Анизотропия свойств обусловлена преимущественным расположением гексагональных кристаллических решеток вдоль оси, а в перпендикулярном направлении ориентированы локальные решетки или малоразмерные группы, в том числе и с искаженной структурой. Данные особенности определяют направления развития дефектов, трещин нанометрового уровня. Отличие результатов прогнозирования свойств углеродных волокон от микроуровня составило до 6,0 % в направлении вдоль оси волокна и до 9,2 % в перпендикулярном направлении.

Следующим этапом выполнено математическое моделирование экспериментов по вытягиванию углеродных волокон из разных матриц УКМ для оценки адгезионной прочности и определения областей появления и развития микротрещин на границах раздела, а также в матрицах. Показано, что адгезионная прочность разных марок углеродных волокон с различными типами матриц находится в интервале от 8,1 до 59,9 МПа с учетом наличия микропор и фрагментированных границ раздела. Пory на границах раздела снижали адгезионную прочность до 43,0 % и возникали значительные области растрескивания по длине, а также в самой матрице, формировались магистральные микротрещины.

По данным микроструктурных исследований и эталонной контактной порометрии построены ПЭО для микро- и мезоуровня. На мезоуровне выделены формы углеродной нити, которые она принимает в разных схемах армирования УКМ для определения эффективных характеристик с учетом того, что на микроуровне в нити расположено до 12000 волокон с действительной формой сечения, искривленных по длине, с микротрещинами, фрагментированными участками по длине, порами в межволоконном пространстве. В матрицах учтена остаточная пористость и технология изготовления.

Глава 3 посвящена разработке физических и математических моделей различных стадий изготовления конструкций из УКМ для прогнозирования их характеристик. Математические модели основывались на уравнениях тепломассообмена в нестационарной, трехмерной постановке, которые дополнялись с учетом многомасштабного подхода, а также физико-химических процессов в матрицах. Для полимерных матриц УКМ рассматривались: химическая кинетика с учетом тепловых эффектов, предварительной сшивки, отверждения с разной степенью конверсии; кристаллизация аморфной фазы; усадка; возникновение остаточных деформаций и напряжений. Для получения углерод-карбидокремниевых матриц УКМ характерны процессы тепломассообмена, стадии диффузии, адсорбции реагентов и химической кинетики на поверхности пор в объеме заготовок, а также возникновение остаточных деформаций и напряжений.

В работе определены термодинамические характеристики, вязкости в зависимости от температуры, модули упругости, ТКЛР отвержденных и не отвержденных полимерных связующих, степени сшивки для ЭНФБ, ЭХД-МД,

Этал-Инжект-Т. Проведены исследования для минимизации внутренних напряжений.

Экспериментальные данные по термореактивным связующим применялись для математического моделирования процесса пропитки на разных масштабных уровнях. Установлено, что на микроуровне при пропитке термореактивными полимерными связующими межволоконного пространства формировался неравномерный фронт в объеме, который менялся во времени. Неоднородная по сечению структура углеродных волокон УКН-М-6К, UMT42S-3К, UMT49S-12К, ГЖ-23, UMT430-12К и их расположение в ПЭО приводили к возникновению локальных завихрений при движении полимерных связующих с образованием остаточной атмосферы воздуха в объеме. Максимальная остаточная пористость ПЭО УКМ с термореактивными матрицами составила, в зависимости от марки углеродных волокон: УКН-М-6К: матрица ЭНФБ – 6,6 %; матрица ЭХД-МД – 5,0 %; UMT42S-3К: матрица Этал-Инжект-Т – 4,8 %; UMT49S-12К: матрица Этал-Инжект-Т – 4,9 %; ЭХД-МД – 5,3 %; ГЖ-23: матрица ЭНФБ – 6,1 %; UMT430-12К: матрица ЭХД-МД – 5,9 %; матрица ЭНФБ – 6,2 %. Изучено влияние на полученные результаты искривления углеродных волокон в нити, что характерно для тканых, плетеных структур армирования. Результаты математического моделирования по прогнозированию остаточной пористости, особенностей распределения пор в объеме различных структур армирования УКМ с термореактивными полимерными матрицами верифицированы на образцах материала каждого типа с использованием промышленного томографа Phoenix V|TOME|X М 300. Выявленная пористость образцов отличалась от итоговых расчетных значений не более, чем на 4,8 %.

Закономерности пропитки межволоконного пространства связующими позволили перейти к исследованиям на мезоуровне. Как правило, на мезоуровне можно учитывать типы армирования УКМ, но нет выраженной границы раздела между углеродными нитями и матрицей, потому что в действительности взаимодействие происходит с волокнами. Для моделирования пропитки на мезоуровне УКМ введен ряд допущений, основные из которых: углеродные нити считались пористым материалом с анизотропной проницаемостью; теплофизические и реологические характеристики зависели от температуры; учитывались тепловые эффекты в связующем, теплообмен теплопроводностью, излучением и конвекцией.

При моделировании предполагалось изменение температуры в соответствии с заданной программой нагрева. Установлено, что на мезоуровне пропитка связующими была неравномерной в ПЭО (Рисунок 5). Процесс пропитки самих углеродных нитей происходил неоднородно по объему и медленнее, запаздывание фронта составляло от 0,6 с до 1,3 с (Рисунок 6). Пространство в углеродных нитях заполнялось связующими не только вдоль фронта пропитки, но и по объему из-за более быстрого движения в самой структуре армирования. Полученные результаты моделирования по прогнозированию остаточной пористости, особенностей распределения пор в объеме различных структур армирования УКМ с термореактивными

полимерными матрицами верифицированы на 3-х образцах материала каждого типа объемом 100 мм³. Выполнены исследования с использованием промышленного томографа. Выявленная пористость образцов отличалась от расчетных значений не более, чем на 6,3 %.

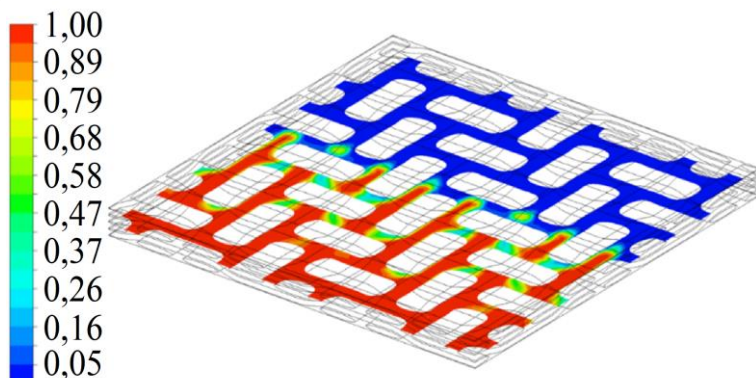


Рисунок 5. Объемная доля связующего Этал-Инжект-Т в сечении при пропитке углеродной ткани саржевого плетения из нити UMT42S-3K в момент времени 1,0 с

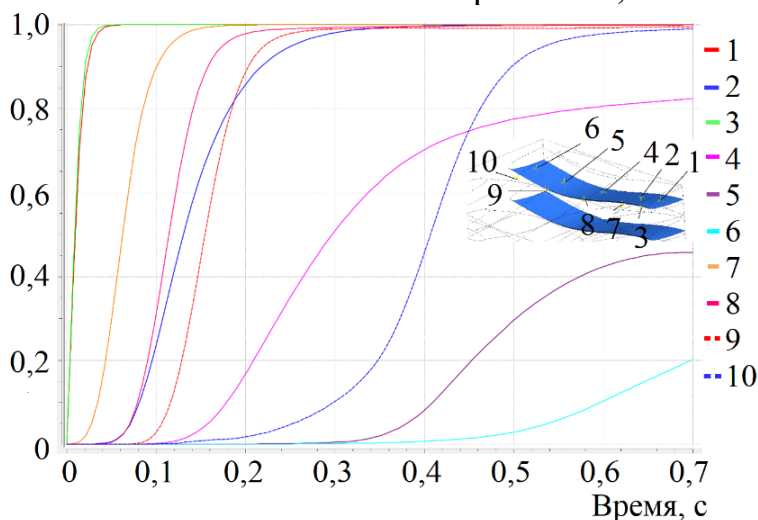


Рисунок 6. Изменение объемной доли связующего ЭНФБ в нити и углеродной ткани полотняного плетения из нити UKN-M-6K при пропитке

При моделировании процесса отверждения термореактивных связующих в ПЭО УКМ на микро, мезоуровнях определены остаточные напряжения, которые могут составить: для тканей полотняного плетения с углеродными нитями UKN-M-6K, UMT42S-3K и связующими ЭНФБ, ЭХД-МД, Этал-Инжект-Т до 2,3 МПа в областях у нитей и до 0,74 МПа в объеме; для тканей саржевого плетения с углеродными нитями UKN-M-6K, UMT42S-3K и связующими ЭНФБ, ЭХД-МД, Этал-Инжект-Т до 2,1 МПа в областях у нитей и до 0,72 МПа в объеме.

В отличие от термореактивных связующих пропитка термопластичным связующем ПЭЭК (и аналогичными связующими) углеродных нитей, тканей осложнена высокой температурой плавления и вязкостью расплава, которая

меняется от скорости сдвига, показателя текучести расплава и температуры. С помощью математического моделирования изучалась равномерность пропитки ПЭЭК углеродной нити UMT49S-12K ленты ПЭО УКМ, а также время, температурные градиенты, возможные области формирования пор, окончательная степень кристалличности и величины остаточных деформаций и напряжений. По результатам моделирования показано, что остаточная пористость может достигать 5,4 %, а остаточные напряжения составляют 0,77 МПа на границах раздела и 0,31 МПа в объеме ПЭЭК. Результаты математического моделирования по прогнозированию остаточной пористости, особенностей распределения пор в объеме УКМ из углеродной нити UMT49S-

12К и ПЭЭК верифицированы на 3-х образцах материала объемом 60 мм³ с использованием промышленного томографа. Установлено, что среднее число пор в образцах 6320, а объемное содержание 5,6 %, что на 3,9 % отличалось от расчетного.

Технологии получения углерод-карбидокремниевых матриц УКМ газофазными методами дают равномерное объемное содержание и достаточно высокие характеристики, но осложнены процессами тепломассообмена с протеканием гетерогенных, многостадийных химических реакций с образованием промежуточных компонентов. Для получения УКМ с углеродной и далее углерод-карбидокремниевой матрицей преимущественно применяются заготовки УКМ с полимерной матрицей после проведения пиролиза и карбонизации. Из-за отсутствия данных по энергии адсорбционного взаимодействия компонентов многостадийных химических реакций с пористым пространством и поверхностью заготовок конструкций из УКМ проведено моделирование на атомно-молекулярном уровне. Установлены следующие абсолютные значения энергий адсорбционного взаимодействия: метана с аморфным углеродом матрицы: от 7,32 кДж/моль до 11,92 кДж/моль; метана с пиролитическим углеродом матрицы: от 7,87 кДж/моль до 12,62 кДж/моль; монометилсилана с пиролитическим углеродом матрицы: от 18,91 кДж/моль до 33,97 кДж/моль.

Определены закономерности формирования углерод-карбидокремниевых матриц УКМ и показано, что в межволоконном пространстве могут формироваться сложные течения газов с локальными завихрениями, областями с низкой скоростью массообмена, неравномерной концентрацией по объему, кроме того, побочные продукты химических реакций разложения на нагретых поверхностях способны влиять на однородное осаждение матриц. Прогнозируемая остаточная пористость в ПЭО УКМ на основе углеродной ткани плотняного плетения (волокна УКН-М-6К, УМТ42S-3К), ткани саржевого плетения (волокна УКН-М-6К, УМТ42S-3К) с углеродной матрицей может составлять, соответственно, до: 11,8 % и 11,2 % для плотняного плетения; 10,7 % и 9,8 % для саржевого плетения. Для ПЭО УКМ с углерод-карбидокремниевой матрицей, соответственно, до: 14,2 % и 13,6 % из ткани плотняного плетения; 13,9 % и 11,7 % из ткани саржевого плетения. Измеренные значения остаточной пористости на образцах УКМ с углеродной матрицей на промышленном томографе отличались не более, чем на 13,8 %, 14,3 % из ткани плотняного плетения и на 11,7 % и 14,1 % из ткани саржевого плетения. Образцы УКМ с углерод-карбидокремниевой матрицей отличались не более, чем на 10,6 %, 11,1 % из ткани плотняного плетения и на 10,2 % и 9,8 % из ткани саржевого плетения от расчетных данных. Полученные результаты учтены при прогнозировании жесткостных, термомеханических и теплофизических характеристик УКМ. Установлено влияние объемной доли углеродных волокон (для разных марок), их искривления в лентах, тканях и др. схемах армирования, а также пор в межволоконном пространстве и различных типах матриц на характеристики УКМ в конструкциях.

В Главе 4 обобщены результаты расчетно-экспериментального определения физико-механических, динамических, термомеханических, теплофизических характеристик УКМ. Приведены результаты экспериментов и выполнена верификация, валидация математических моделей на мезоуровне для УКМ с разными типами матриц. Испытания осуществлялись на разрывных машинах, которые имели действующие сертификаты о поверки на момент проведения экспериментов, а для измерения деформаций применены тензодатчики серии UBFLA, BFLA, ТКФ, бесконтактный экстензометр videoXtens. Схемы размещения тензодатчиков: один датчик в центре фронтальной стороны образцов; два датчика с тыльной стороны образцов.

Перед проведением испытаний образцов УКМ с разными матрицами выполнены исследования влияния текстильной переработки на физико-механические характеристики волокон. Из образцов ткани были выбраны нити основы и утка и проведены их испытания для определения предела прочности, модуля упругости и относительного удлинения углеродных волокон. Образцы углеродных волокон в количестве 40 шт. отбирались из каждой из пяти нитей основы и утка для ткани полотняного и саржевого плетения. Показано, что происходила деградация физико-механических характеристик при текстильной переработке углеродных волокон не менее, чем на 23 %.

Использование в УКМ высокопрочных углеродных волокон позволило реализовать высокие прочностные характеристики вдоль оси армирования до 2,3 ГПа при модуле упругости около 160 ГПа. Углеродные волокна марки ГЖ-23 обеспечивали в УКМ модуль упругости при растяжении до 290 ГПа. УКМ на основе тканых схем армирования с полимерными матрицами имели предел прочности при растяжении вдоль основы до 0,9 ГПа при модуле упругости около 92 ГПа, с углеродными матрицами, соответственно, модуль составлял до 65 ГПа, с углерод-карбидокремниевой матрицей модуль доходил до 70 ГПа.

В соответствии с видом испытаний построены геометрические модели образцов УКМ с разными схемами армирования и типами матриц, а в области вероятного разрушения учтена действительная структура мезоуровня (Рисунок 7). При переходе на микроуровень в пучках углеродных нитей учитывалась остаточная пористость и реальная форма сечения волокон. Результаты численного моделирования находятся в хорошем согласии с данными по испытаниям образцов УКМ. Выявлены механизмы влияния структурных дефектов, трещин от микроуровня до мезоуровня и их эволюция в УКМ при действии различного рода нагрузок. Отличие результатов параметрических расчетов от экспериментов составило от 1,4 % до 9,7 %. Благодаря учету адгезионной прочности на границах раздела удалось спрогнозировать близкие по характеру виды разрушения углеродных волокон, матриц в УКМ. Поры в матрицах приводили к возникновению локальных концентраторов напряжений и формированию микротрещин с последующей фрагментацией границ раздела и разрывом углеродных волокон. Протяженные элементы разрушенных углеродных волокон в ПЭО УКМ воспринимали

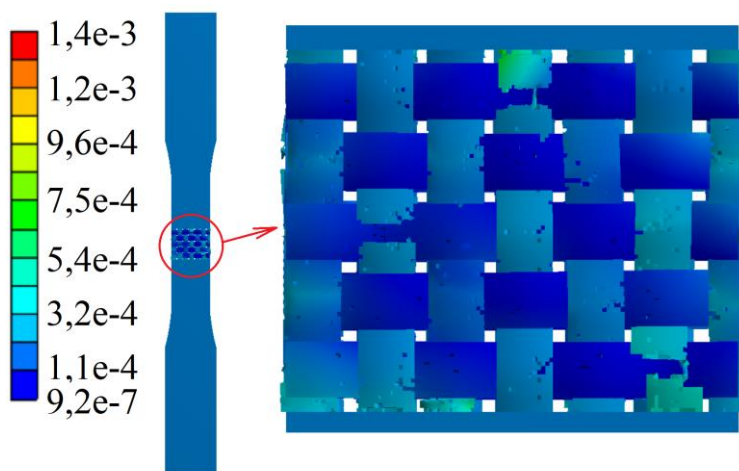


Рисунок 7. Общие перемещения при испытании на растяжение (нагрузка 85 % от разрушающей) образца УКМ на основе ткани полотняного плетения из нити UMT42S-3K и матрицы ЭНФБ, м

нагрузку частично в диапазоне от 23 % до 58 % в сравнении с не разрушенными при условии сохранения адгезионной прочности границы раздела.

Для определения термомеханических, теплофизических характеристик УКМ использовался контактный дилатометр, установка определения теплопроводности методом лазерного импульса и дифференциально сканирующий калориметр. Разработанные математичес-

кие модели, ПЭО УКМ позволили расширить полученные ранее данные по эффективным характеристикам, изучить температурные перепады, напряжения на разных масштабных уровнях, а также исследовать влияние остаточной пористости. Определены оптические характеристики УКМ с различными типами матриц.

Для УКМ с разными схемами армирования и типами матриц коэффициенты демпфирования находились в диапазоне от 0,5 % до 12,0 %. Результаты численного моделирования по определению собственных форм колебаний пластин из УКМ соответствовали экспериментальным данным с погрешностью менее 4,0 %.

Для оценки термостойкости в условиях конвективного нагрева УКМ проведены экспериментальные исследования с использованием высокочастотного индукционного плазматрона ВГУ-4 в Институте проблем механики им А.Ю. Ишлинского РАН. При проведении испытаний образцов из УКМ в плазматроне ВГУ-4 первоначально выбирались: диаметр сопла газоразрядного канала; расстояние от сопла до фронтальной поверхности испытываемого образца; мощность анодного питания; давление в испытательной камере; режим течения потока плазмы. Для выбора данных параметров проведено математическое моделирование эксперимента по испытанию образцов из УКМ. Математическая модель включала в себя уравнения для газодинамики плазмы, сопряженного теплообмена в системе со сложной геометрией, а также уравнения для описания процессов абляции материала.

После с учетом результатов численного моделирования проведены исследования термостойкости УКМ с разными типами матриц.

В Главе 5 рассмотрена система контроля температур, формирования, накопления остаточных деформаций, появления трещин и их развития в конструкциях из УКМ. Изготовление конструкций из УКМ сопровождаются

физико-химическими процессами в матрицах, которые вызывают внутренние остаточные деформации, напряжения и могут вызывать искажения геометрических размеров и формы. Экспериментальное изучение физико-химических процессов в матрицах УКМ и математическое моделирование (представлено в Главе 3) позволили спрогнозировать уровень, характер остаточных деформаций и напряжений, однако полученные результаты требуют верификации и валидации.

Распространенные средства измерения температур и деформаций не пригодны для изучения явлений в объеме материала. Для таких измерений можно использовать распределенные системы ОВД с решетками Брэгга, когда на одном оптоволокне размещены от 1 до 60 решеток с шагом от 2 мм до 1000 мм.

Отработаны технологические приемы внедрения ОВД с решетками Брэгга на стадии изготовления конструкций из УКМ с полимерными матрицами, а также на отдельных стадиях изготовления с углерод-карбидокремниевой матрицей, которые позволили минимизировать влияние на сам датчик и искажение структурной ячейки. В работе использовались ОВД с одной, двумя, тремя решетками Брэгга диаметром 159 ± 1 мкм с покрытием из меди или полиимида (без покрытия 125 ± 1 мкм) и сердечником из кварцевого стекла КС-48 диаметром 1 мкм. Оценка остаточных деформаций проведена для разных типов матриц, режимов отверждения и видов оборудования: электропечь сопротивления и автоклав с размещением заготовок в вакуумном мешке; автоматизированная установка с выкладочной головой; электропечь сопротивления для карбонизации.

Показания ОВД с решетками Брэгга сравнивались с данными термпар при проведении режимов отверждения пластин из УКМ с полимерными матрицами в сушильном шкафу и в автоклаве. Установлено, что: точность определения температур с помощью ОВД с решетками Брэгга составляет 0,01 К в диапазоне от 290 до 700 К; ОВД с решетками Брэгга работоспособны при воздействии избыточного давления и температур отверждения полимерных связующих УКМ.

Уровень остаточных деформаций был измерен в элементах конструкций из УКМ при продольном и поперечном размещении ОВД с точностью 10^{-6} . Остаточные напряжения составляли от 0,06 МПа до 2,48 МПа и отличались от расчетных значений не более, чем на 12,1 %.

В результате испытаний пластин, цилиндрических оболочек из УКМ установлено, что показания ОВД с решетками Брэгга обеспечивали более высокую точность и по характеру изменений деформаций соответствовали тензодатчикам. Отличие показаний на уровне 13,6 % вызвано тем, что тензодатчики закреплялись на поверхности пластин, цилиндрических оболочек из УКМ с помощью клеевой прослойки, а ОВД внедрялись в объем материала.

Для определения остаточных деформаций и воспроизводимости измерений ОВД с решетками Брэгга была проведена серия экспериментов с повторным нагревом и управляемым охлаждением пластин из УКМ. Показано, что при скоростях нагрева от 1 К/мин до 3 К/мин до 90 % от температуры стеклования связующих и выдержкой с учетом тепловой инерции можно снизить уровень

остаточных деформаций и напряжений от 6,8 % до 19,2 % при однократном процессе термообработки.

Использование внедренных ОВД с решетками Брэгга совместно с многомасштабными математическими моделями позволило создать систему контроля за появлением и развитием трещин в конструкциях из УКМ. Для реализации системы построены цифровые двойники и проведена верификация, валидация с идентичными натурными образцами, конструкциями из УКМ с внедренными ОВД с решетками Брэгга.

Новая система опробована на элементах конструкций в виде пластин, ферм, которые изготовлены на основе углеродной ленты из нитей УКН-М-6К и связующего ЭНФБ. Размер пластин 200x40x1,8 мм с общим количеством слоев – 12 (в шестой слой внедрены в продольном направлении один ОВД с двумя решетками Брэгга с длинами волн 1560 и 1570 нм, а в седьмой слой один ОВД с решеткой Брэгга 1575 нм), для фермы размеры 510x120x3,8 мм с количеством слоев – 26 (в тринадцатый слой внедрены в продольном направлении один ОВД с тремя решетками Брэгга, а в четырнадцатый слой два ОВД один с двумя, второй с тремя решетками Брэгга вдоль ребер с длинами волн 1535, 1540, 1545, 1550, 1555, 1560, 1570, 1580 нм, соответственно). Отверждение проводилось в автоклаве в вакуумном мешке с избыточным давлением от 0,4 до 1,0 МПа. Полученные значения остаточных деформаций и напряжений учитывались в цифровом двойнике, как предварительное напряжённое состояние. Далее для верификации и валидации математических моделей проведены испытания пластин из УКМ на изгиб, а фермы из УКМ на растяжение с контролем полей деформаций с помощью внедренных ОВД с решетками Брэгга и сравнение их показаний с цифровым двойником.

Пластины из УКМ нагружались изгибающей силой по следующим режимам: 200 Н, 300 Н, 400 Н, 500 Н, 600 Н со скоростью 5 мм/мин; до разрушения со скоростью 10 мм/мин. Решетки Брэгга выявили образование первичных трещин и их развитие в объеме до разрушения пластин, что показано по результатам испытаний на изгиб и изменению спектра при действии нагрузки. Первоначально фиксировалось расщепление резонансного пика ОВД с решеткой Брэгга с длиной волны 1560 нм, внедренного в пластину из УКМ в области действия индентора разрывной машины, при нагрузках начиная с 300 Н, но после снятия нагрузки пик возвращался в исходное состояние, что свидетельствовало о появлении первичных микротрещин на границах раздела «волокно – матрица» и в самой матрице. При последующем испытании при изгибной нагрузке до 500 Н фиксировались уже локальные расслоения и образования трещин, что определено по большему раздвоению пика. Последующее нагружение пластины показало возможность отслеживания развития трещин до разрушения, что зафиксировано эффектом двулучепреломления решеток Брэгга с фиксацией деформаций и напряжений, а также дефектоскопией пластин с помощью томографа. Результаты испытаний цифрового двойника пластины из УКМ с ОВД с решетками Брэгга в нестационарной трехмерной постановке хорошо согласовались с данными экспериментов. Показано, что отличие по

максимальным перемещениям до разрушения составляло не более 1,1 %, а по нагрузкам не более 2,2 %. Измеренные деформации отличались от расчетных в пределах 3,9 %.

Ферма из УКМ нагружалась растягивающей силой по следующим режимам: 5 кН, 10 кН, 15 кН, до разрушения. По результатам исследований и моделирования испытаний фермы из УКМ с внедренными ОВД с решетками Брэгга установлено, что: погрешность показаний решеток Брэгга при повторном нагружении не превышала 6,2 %, а погрешность тензодатчиков достигала 17,8 % (Рисунок 8). Расчетные значения деформаций и напряжений при моделировании испытаний на растяжение цифрового двойника фермы из УКМ хорошо согласуются с данными экспериментов, а их отличие не превышало 6,2 %.

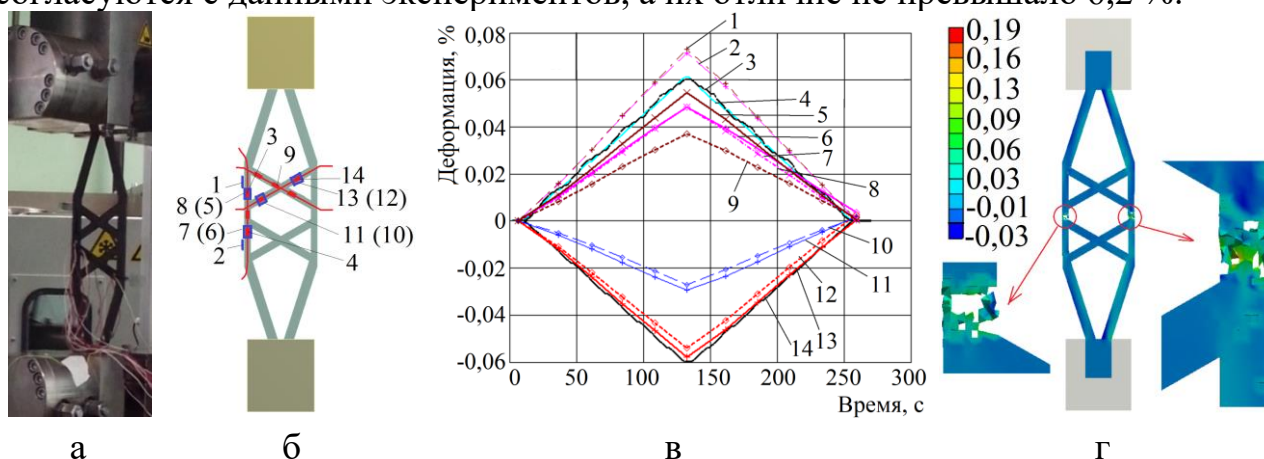


Рисунок 8. Прочностные испытания фермы из УКМ: а – натурная конструкция; б – геометрическая модель с указанием мест расположения решеток Брэгга и тензодатчиков; в – измеренные деформации при нагружении 10 кН, %; г – деформации вдоль оси нагружения при моделировании испытания до разрушения, %

В Главе 6 для апробации методологии выбраны разнотипные модельные конструкции из УКМ с общеизвестными областями применения: жесткий рефлектор бортовой космической антенны (далее РКА) диаметром 2 м из УКМ на основе углеродной ленты из нити UMT430-12K и связующего ЭНФБ с диапазоном рабочих частот К и Ка для геостационарного спутника связи; элемент размеростабильной космической платформы (РКП) в виде трехслойной панели размерами 1,4x1,0 м² с обшивками из УКМ на основе углеродной ленты из нити UMT49S-12K и связующего ПЭЭК для спутника дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на солнечно-синхронной орбите; конструктивно-силовая схема (КСС) крыла габаритными размерами 3,4x1,2 м² из УКМ на основе углеродной ленты из нити UMT49S-12K и связующего Этал-Инжект-Т для многоразового КА; неохлаждаемый сопловой насадок (НСН) с диаметром на срезе 1 м из УКМ на основе ткани из нити УКН-М-6К и углерод-карбидокремниевой матрицы для ЖРД на компонентах топлива О₂ и СН₄.

Профиль внешних и внутренних поверхностей разнотипных конструкций из УКМ выбран по результатам решения следующих типовых задач:

– электромагнетизма для построения профиля отражающей поверхности, диаграммы направленности и определения коэффициента усиления с учетом диапазона рабочих частот для РКА. Граничные условия воспроизводили наличие облучателя, контррефлектора, параметры его работы и расположение, а также данные по эксплуатации;

– теплообмена при орбитальном полете РКА и РКП. Граничные условия учитывали прямое и отраженное от Земли излучение Солнца и собственное излучение Земли;

– аэродинамики для выбора формы в плане, средней аэродинамической хорды, стреловидности для крыла. Граничные условия учитывали данные по скоростному напору, окружающей среде и разные углы атаки, соответствующие траектории полета;

– тепломассообмена, химической кинетики при горении компонентов топлива CH_4 и O_2 для определения расчетных точек контура НСН, угла наклона вектора скорости в критическом сечении, угла не параллельности потока на выходе из сопла. Граничные условия: давление в камере сгорания; массовый расход и соотношение компонентов топлива CH_4 и O_2 ; реакции горения; давление окружающей среды.

Функциональная эффективность рассматриваемых конструкций определялась в результате сравнения с прототипами, созданными по традиционным схемам проектирования и производства.

Установленная отражающая поверхность РКА из УКМ диаметром 2 м представляет собой параболоид с отверстием под облучающую систему, а достигнутый коэффициент усиления составил 56,8 дБ. Рассмотрены различные варианты установки контррефлектора, его формы, формы облучающей системы, а также определены амплитудно-фазовые распределения в плоскости апертуры, построены диаграммы направленности для диапазона рабочих частот К и Ка.

На освещенном Солнцем участке траектории полета по геостационарной орбите максимальная температура на РКА из УКМ достигала 392,3 К, а на теневом участке минимальная температура опускалась до 129,3 К. Анизотропия коэффициентов теплопроводности УКМ создает максимальный температурный перепад около 148 град. При полете по солнечно-синхронной орбите в составе спутника ДЗЗ максимальная температура элемента РКП из УКМ достигала 319,2 К, а на теневом участке минимальная температура доходила до 185,3 К. Максимальный температурный перепад по поверхности элемента РКП из УКМ составлял 79,8 град., а по толщине 46,3 град.

В зависимости от режимов полета на обшивках крыла из УКМ могут возникать следующие максимальные нагрузки: давления до 0,86 МПа; моменты до 74 кН·м; распределенные нагрузки до 55,4 кН; температуры под теплозащитой до 461 К, а перепады по поверхности до 116 град.

При моделировании условий эксплуатации установлено, что наибольшие температуры на НСН из УКМ могут составить 1739 К (Рисунок 9), перепады температур до 658 град., а давления до 318 кПа.

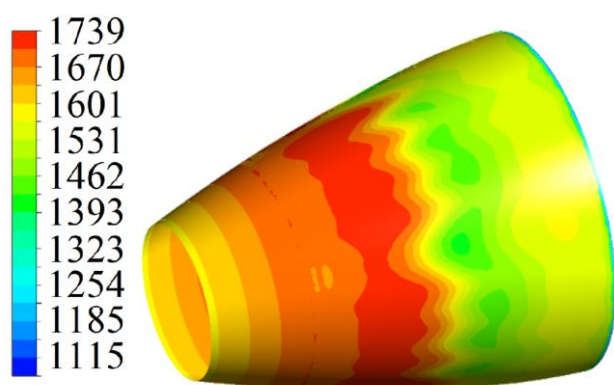


Рисунок 9. Распределение температур на насадке из УКМ в момент времени 50 с при работе ЖРД, К

При параметрическом моделировании деформативности углеродных наполнителей с учетом кривизны геометрии конструкций из УКМ для минимального искажения структурных ячеек при формообразовании установлено, что: для РКА искажения могут достичь $12,5^\circ$ на оболочке при схеме армирования $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_n$ с выкладкой сегментами для обеспечения радиально-окружной укладки лент, а без локального

раскроя материала на ребрах до 38° . В случае создания разверток и раскроя значения снижались до 9° при схеме армирования $[0^\circ/90^\circ]_n$. Для обшивок РКП при схеме армирования $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_n$ искажения не превышали $2,1^\circ$. Искажения структурных ячеек для крыла из УКМ достигали 31° , а с раскроем – $7,5^\circ$ для ребер при схеме армирования $[0^\circ/90^\circ]_n$ и до $0,6^\circ$ для обшивок при схеме армирования $[0^\circ/\pm 52^\circ/90^\circ]_n$. Для НСН искажения локально доходили до $27,6^\circ$ при схеме армирования $[0^\circ/90^\circ]_n$.

Выбор вариантов КСС конструкций из УКМ выполнялся с помощью параметрической и топологической оптимизации. Варьировались как геометрические параметры, так и варианты КСС для достижения требуемой первой собственной частоты от 30 до 60 Гц, коэффициента запаса от 1,2 до 2,0 в зависимости от конструкции и минимальной массы при действии эксплуатационных нагрузок.

В рамках разработанной методологии выполнено математическое моделирование процессов получения конструкций из УКМ с учетом тепломассообмена, химической кинетики, пропитки, отверждения, газофазного осаждения, формирования остаточной пористости и деформаций. Построены геометрические модели оснасток и промышленного оборудования.

Пропитка заготовок конструкций из УКМ (РКА, крыла) осуществлялась методом вакуумной инфузии с последующим отверждением в промышленном автоклаве с размещением на оснастках. Показано, что даже при выборе рациональных технологических параметров пропитка термореактивными полимерными связующими заготовок происходила неравномерно в объеме с образованием локальных завихрений потока и запаздыванием отдельных участков фронта. Для снижения объемной доли остаточного воздуха необходимо последующее автоклавное формование. Выполнено многомасштабное моделирование тепломассообмена при отверждении термореактивных связующих в заготовках конструкций РКА, крыла по рациональным технологическим режимам в автоклавах для прогнозирования величин остаточных деформаций, напряжений и степени сшивки (Рисунок 10).

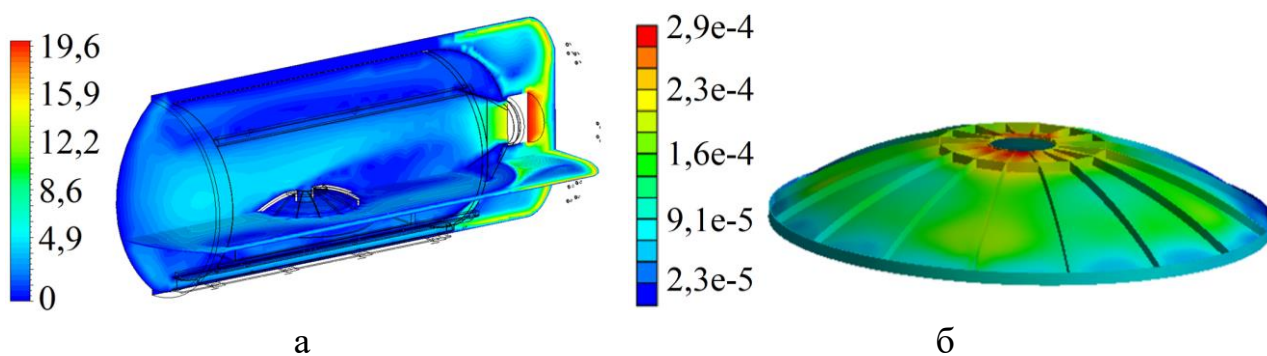


Рисунок 10. Моделирование изготовления рефлектора: а – профиль скорости в камере автоклава на 31600 с, м/с; б – остаточные перемещения после отверждения заготовки, м

Определено влияние технологических параметров (скорость нагрева / охлаждения, время выдержки и температура на режиме, скорость вращения вентилятора, давление в камере автоклава) на температурные перепады, коэффициенты теплоотдачи на заготовках рефлектора и крыла в различные моменты времени.

Показано, что в зависимости от геометрии, типа и тепловой инерции оснастки, режимов отверждения в автоклаве в конструкциях могут возникать остаточные деформации и напряжения на разных структурных уровнях от микро до макро. Установлено, что на макроуровне: для РКА остаточные перемещения могут достигать 297 мкм, а напряжения в среднем до 21 МПа при общей степени сшивки 0,99 с разбросом показаний 0,48 %. СКО фронтальной поверхности РКА после отверждения и снятия с оснастки может составить 49,4 мкм. Для крыла остаточные перемещения могут достичь 1,53 мм, а напряжения до 49 МПа и в среднем до 28 МПа при общей степени сшивки 0,99 с разбросом показаний 0,21 %. СКО обшивок составит 462 мкм после отверждения.

Элемент РКП состоит из 2-х обшивок из УКМ, изготавливаемых автоматизированной выкладкой и сотового заполнителя. Для анализа остаточных деформаций и напряжений в обшивках выполнено математическое моделирование нестационарного теплообмена при выкладке препрега на основе углеродной ленты из нити UMT49S-12K и связующего ПЭЭК. Для минимизации образования остаточных напряжений варьировалась мощность лазерного нагрева, скорость выкладки, контактное давление при прикатывании роликом, а также параметры оснастки. Установлено, что остаточные напряжения после автоматизированной выкладки в слоях могут составить до 1,3 МПа, что согласуется с данными экспериментов.

Аналогичные этапы моделирования выполнены и для насадка, включая стадии изготовления заготовки с полимерной матрицей, пиролиза, карбонизации, газофазного осаждения в пористую заготовку углерод-карбидокремниевой матрицы. Результаты математического моделирования показали, что: в промышленной установке можно достичь перепадов температур по высоте заготовки до 12,4°C при осаждении углеродной матрицы и до 7,7°C при осаждении карбидокремниевой матрицы. При этом скорости осаждения

углеродной матрицы составляли от 0,16 мкм/ч до 0,21 мкм/ч, карбидокремниевой от 0,023 мкм/ч до 0,039 мкм/ч. Разброс в скоростях осаждения по заготовке вызван сложными течениями газов с локальными завихрениями, наличием областей с низкой скоростью массообмена, неравномерной концентрацией по объему, влиянием побочных продуктов химических реакций.

Регулируя параметры процесса, можно достичь неоднородности скорости роста по высоте до 10,9 % для углеродной матрицы и 12,9 % для карбидокремниевой матрицы.

Следующим этапом, с учетом установленных данных по характеристикам УКМ в конструкциях в зависимости от технологии изготовления, иерархии структурных уровней и наличия дефектов, остаточных деформаций и напряжений, выполнено моделирование действия нагрузок при эксплуатации (Рисунки 11, 12) для расчета температурного состояния, НДС, устойчивости и кратности применения, а также функциональной эффективности.

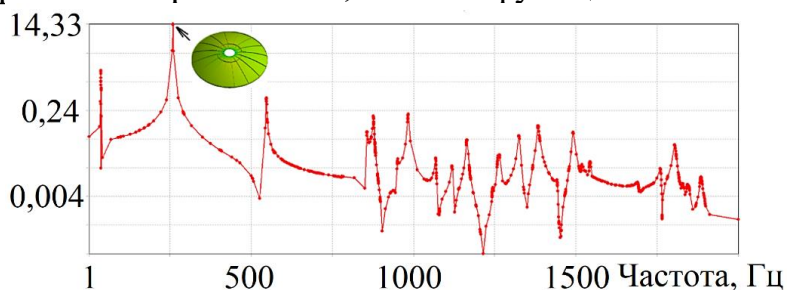


Рисунок 11. Изменение нормальных напряжений вдоль оси X в плоскости армирования РКА из УКМ при действии случайных вибраций в диапазоне частот с уровнем до 12 g, МПа

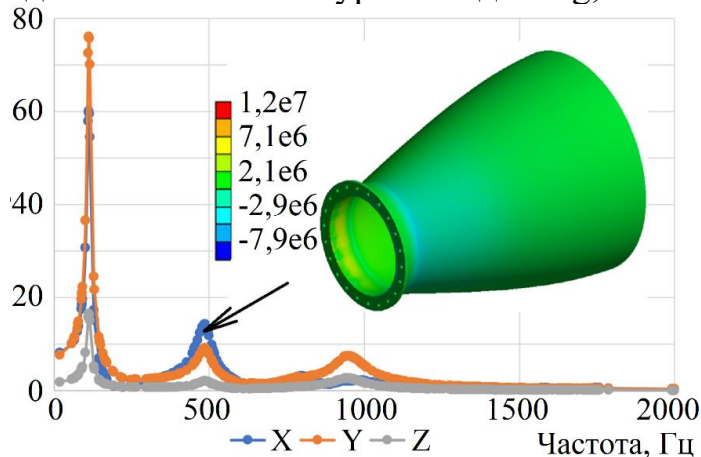


Рисунок 12. Изменение нормальных напряжений вдоль осей в НСН из УКМ при действии случайных вибраций в диапазоне частот с уровнем до 12 g, МПа

Установлено, что наибольшие нормальные напряжения при старте могут составлять до: 57 МПа для РКА; 36 МПа для РКП; 246 МПа для крыла; 21 МПа для НСН, а нормальные напряжения при эксплуатации достигали следующих значений: 34 МПа для РКА; 27 МПа для РКП; 414 МПа для крыла; 128 МПа для НСН. Запас по устойчивости составлял для конструкций из УКМ: 8,6 для РКА; 3,2 для РКП; 3,5 для крыла; 1,2 для НСН. Напряжения не превышали предельных значений, а коэффициенты запаса составляли от 1,21 до 2,37 в зависимости от типа конструкции.

При ударе микрометеороидами и частицами космического мусора с плотностью от 500 кг/м³ до 2700 кг/м³ и диаметром от 0,1 до 120 мм сквозное разрушение и растрескивание в РКА и РКП будет зависеть от места попадания,

угла соударения, а также скорости, которая лежит в интервале от 0,1 до 15 км/с, что подтверждено результатами численного моделирования.

Установлена возможность повышения функциональных характеристик разнотипных модельных конструкций из УКМ по сравнению с существующими известными аналогами: для РКА диаметром до 2 м может быть достигнуто снижение веса на 27,9 % и СКО отражающей поверхности на 4,1 %; для элементов РКП с габаритными размерами до 1,4x1,0 м² возможно снижение веса на 10,3 % и снижение СКО фронтальной поверхности на 13,6 %; для крыла с габаритными размерами 3,4x1,2 м² можно уменьшить вес на 13,5 % и повысить жесткость на 9,0 % при кратности применения 34; для НСН с диаметром на срезе до 1 м может быть достигнуто снижение веса на 5,3 %, а СКО снижено на 9,9 % при кратности применения 13. Результаты сравнивались с параметрами для аналогов.

Методология апробирована и при проектировании, создании конструкций из УКМ:

- в АО «Решетнёв» применение методологии и результатов работы позволило снизить коэффициент безопасности на разброс характеристик материалов, в отдельных случаях, с 1,5 до 1,2, соответственно, повысив весовую эффективность для конструкции на 20 %. Расчетно-экспериментальные оценки точности формы рефлекторов прецизионных космических антенн с учетом влияния технологических параметров при изготовлении позволили уменьшить СКО до 2-х раз;

- в АО «РКЦ «Прогресс» методология использована при математическом моделировании составных частей РН. Система контроля температур, формирования, накопления остаточных деформаций, появления трещин и их развития в конструкциях из УКМ представляет интерес для наземной экспериментальной отработки и проведения предварительных испытаний;

- в АО «НПО Энергомаш» методы многомасштабного математического моделирования температурного состояния и НДС использованы для оценки возможности появления, развития дефектов в конструкциях из УКМ при действии эксплуатационных нагрузок.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты работы.

В приложении представлены данные по конструкциям из УКМ для ЛА и эксплуатационным нагрузкам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Конструкции из УКМ обладают уникальным сочетанием функциональных характеристик и работоспособны в широком диапазоне тепловых и силовых нагрузок. Однако их предельные возможности ещё не полностью раскрыты из-за несовершенства методов проектирования и производства, которые не учитывают действительные структурные особенности материалов, дефекты, остаточные деформации и напряжения.

2. Создана новая методология гарантированного совершенства конструкций из УКМ на основе многомасштабного математического моделирования взаимосвязанных нестационарных процессов тепломассообмена, химической кинетики, механики композитных сред и молекулярной динамики с помощью которых температурное и напряженно-деформированное состояние, образование дефектов и разрушение изучаются на четырех масштабных уровнях: атомно-молекулярном, микро-, мезо- и макро-. Разработанные модели учитывают возникновение дефектов с атомно-молекулярного уровня размерами от 0,01 нм в кристаллических и аморфных структурах и их эволюцию под действием нагрузок, взаимное влияние отстоящих дефектов и трещин друг от друга на расстояниях 0,001 – 2,5 мкм и более; физико-химические процессы в матрицах при изготовлении, накопление остаточных деформаций и напряжений.

3. Выявлены закономерности образования, взаимного влияния дефектов и их эволюции в УКМ при изготовлении и эксплуатации. Установлена сильная зависимость результатов определения характеристик на атомно-молекулярном уровне от однородности решеток, энергии межатомного взаимодействия, а также диагонального размера нанопор от 0,01 до 0,5 нм. Тем самым подтверждена корректность гипотезы выбора микроуровня для верификации, валидации и возможности достоверного определения физико-механических и теплофизических характеристик с учетом геометрии сечений углеродных волокон, степени их искривления; фрагментированных границ раздела «волокно – матрица», величины адгезионной прочности; формы, размеров и распределения пор. Показано, что: степени анизотропии углеродных волокон УКН-М-6К, UMT42S-3К, UMT49S-12К, UMT430-12К, ГЖ-23 в зависимости от марки составляют от 17,1 до 28,5; адгезионные прочности углеродных волокон к различным типам матриц (эпоксидные, цианат-эфирная, ПЭЭК, углерод-карбидокремниевая) лежат в интервале от 8,1 до 59,9 МПа, а поры на границах раздела «волокно – матрица» снижают прочность до 43 %; на расстояниях более 2,6 мкм микротрещины в углеродных волокнах развиваются без взаимного влияния; эволюция микротрещин в углеродных волокнах разных марок может снижать их продольный коэффициент теплопроводности более, чем на 38 %.

4. По результатам расчетно-теоретических исследований впервые сформулированы критерии прочности и феноменологические модели разрушения углеродных волокон УКН-М-6К, UMT42S-3К, UMT49S-12К, UMT430-12К, ГЖ-23 и показано, что уровни деградации физико-механических характеристик волокон при текстильной переработке углеродных нитей в ткани полотняного и саржевого плетения составляют более 23%. Определены физико-механические, теплофизические, термомеханические, динамические характеристики УКМ с разными типами матриц.

5. Определены взаимосвязи форм и видов дефектов с характеристиками УКМ в конструкциях. Установлена возможность повышения прочности при сжатии в плоскости армирования от 9,4 % до 17,1 % и межслоевой прочности от 8,3% до 34,9 % за счет снижения: остаточной пористости до 6,6 % в межволоконном пространстве углеродных нитей и до 0,5 % в объеме для УКМ с

полимерными матрицами; остаточной пористости до 11,8 % в объеме для УКМ с углеродной матрицей; остаточной пористости до 14,2 % в объеме для УКМ с углерод-карбидокремниевой матрицей; уровня остаточных напряжений до 0,77 МПа в межволоконном пространстве нитей, до 2,6 МПа в областях у нитей и до 0,9 МПа в объеме между углеродными нитями тканых и объемных структур армирования.

6. Разработана система измерения температур, формирования, накопления остаточных деформаций, появления трещин и их развития в конструкциях из УКМ при изготовлении и эксплуатации, которая позволила установить, что: уровень остаточных напряжений в зависимости от схемы армирования и матрицы может достигать 2,48 МПа; при температурной обработке может быть понижен уровень остаточных деформаций и напряжений до 19,2 % при однократном процессе; изменение спектра решеток Брэгга ОВД коррелирует с образованием, развитием трещин, что находится в согласии с результатами моделирования и испытаний натуральных элементов.

7. Применение методологии позволило спрогнозировать остаточные деформации, перепады температур при изготовлении, деформации, напряжения при действии различного рода нагрузок, а также появление, развитие трещин, характер разрушения и в итоге повысить весовые характеристики до 27,9 % (для РКА диаметром до 2 м), функциональные характеристики до 13,6 % (для РКП с габаритными размерами до 1,4x1,0 м²), а также кратность применения до 34 (для крыла с габаритными размерами 3,4x1,2 м²) разнотипных модельных конструкций из УКМ по сравнению с аналогами.

Основные результаты диссертации отражены в работах

1. Михайловский К.В. Исследование напряженно-деформированного состояния крупногабаритной конструкции из углерод-керамического композиционного материала C-SiC на макро- и микроструктурном уровнях при воздействии эксплуатационных нагрузок // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2010. № 11 (77). С. 17 – 22 (0,375 п.л.).

2. Михайловский К.В. Моделирование многостадийного технологического процесса получения углерод-керамических композиционных материалов // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 3. С. 45 – 47 (0,1875 п.л.).

3. Михайловский К.В., Просунцов П.В., Резник С.В. Разработка высокотеплопроводных полимерных композиционных материалов для космических конструкций // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2012. № 9. С. 98 – 114 (1,0625 п.л. / 0,45 п.л.).

4. Резник С.В., Михайловский К.В. Интеллектуализация выбора технологических параметров процесса газофазного осаждения для получения деталей из УККМ // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. № 1. С. 24 – 33 (0,625 п.л. / 0,59 п.л.).

5. Михайловский К.В., Резник С.В. Разработка математико-алгоритмического обеспечения для расчета внутренних напряжений в тонкостенных рефлекторах из углепластика во время технологического процесса их изготовления // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 8. С. 151 – 166 (1,0 п.л. / 0,9 п.л.).

6. Михайловский К.В., Резник С.В. Влияние внедренных измерительных датчиков на температурное и напряженно-деформированное состояния деталей из углерод-керамического композиционного материала // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 6. № 7. С. 324 – 328 (0,3125 п.л. / 0,29 п.л.).

7. Михайловский К.В., Резник С.В. Прогнозирование температурных режимов процесса отверждения связующего при получении деталей из полимерных композиционных материалов с помощью микроволнового излучения // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 6. № 8. С. 363 – 368 (0,375 п.л. / 0,3 п.л.).

8. Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhailovskii K.V. Prediction of thermophysical and thermomechanical characteristics of porous carbon-ceramic composite materials of the heat shield of aerospace craft // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015. Vol. 88. No. 3. P. 594 – 601. DOI: 10.1007/s10891-015-1227-1 (0,5 п.л. / 0,25 п.л.).

9. Агеева Т.Г., Михайловский К.В. Обоснование выбора материалов для крыла суборбитального многоразового космического аппарата туристического класса // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 10 (58). 9 с. DOI: 10.18698/2308-6033-2016-10-1543 (0,5625 п.л. / 0,26 п.л.).

10. Конструктивная схема сверхлегкого размеростабильного антенного рефлектора. К.В. Михайловский, П.В. Просунцов, С.В. Резник, А.Д. Новиков. Патент на полезную модель RU 163501 U1, 20.07.2016. Заявка № 2015157095/28 от 30.12.2015.

11. Михайловский К.В., Просунцов П.В., Резник С.В. Конструктивная схема крупногабаритного трансформируемого антенного рефлектора зонтичного типа. Патент на полезную модель RU 163502 U1, 20.07.2016. Заявка № 2015157110/28 от 30.12.2015.

12. Михайловский К.В., Базанов М.А. Измерение остаточных технологических деформаций в углепластике путем внедрения в него волоконных брэгговских решеток // Конструкции из композиционных материалов. 2016. Т. 142. № 2. С. 54 – 58 (0,312 п.л. / 0,16 п.л.).

13. Reznik S.V., Mikhailovskii K.V., Prosuntsov P.V. Heat and mass transfer in the chemical vapor deposition of silicon carbide in a porous carbon-carbon composite material for a heat shield // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. Vol. 90. No. 2. P. 291 – 300. DOI: 10.1007/s10891-017-1567-0 (0,625 п.л. / 0,55 п.л.).

14. Михайловский К.В., Городецкий М.А. Разработка методики определения и коррекции параметров рабочей орбиты космического аппарата дистанционного зондирования земли // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 3. С. 361 – 372. DOI:10.22363/2312-8143-2017-18-3-361-372 (0,75 п.л. / 0,25 п.л.).

15. Reznik S.V., Mikhailovskiy K.V., Prosuntsov P.V. Modeling the heat and mass transfer in the pores of the thermal protection carbon-carbon frame during the gas-phase deposition of silicon carbide // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 92. 01075. 6 p. DOI: 10.1051/matecconf/20179201075 (0,375 п.л. / 0,3 п.л.).

16. Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhailovskii K.V. Thermal regime of large space structure with transformable elements from hybrid composite // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1134. 012048. 7 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1134/1/012048 (0,4375 п.л. / 0,25 п.л.).

17. Михайловский К.В., Барановски С.В. Методика проектирования крыла из полимерных композиционных материалов на основе параметрического моделирования. Часть 3. Выбор и обоснование оптимальных схем армирования силовых элементов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 5 (698). С. 75 – 84. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-5-75-84 (0,625 п.л. / 0,16 п.л.).

18. Разработка схемы подкрепления отражающей обшивки рефлектора методами параметрической и топологической оптимизации / Е.К. Филина, Е.С. Голубев, К.В. Михайловский, М.Ю. Архипов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 4. С. 276 – 284. DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-4-276-284 (0,5 п.л. / 0,2 п.л.).

19. Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhailovskii K.V. Development of elements of reusable heat shields from a carbon–ceramic composite material 1. Theoretical forecast // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2019. Vol. 92. No. 1. P. 89 – 94. DOI: 10.1007/s10891-019-01910-0 (0,375 п.л. / 0,3 п.л.).

20. Development of elements of a reusable heat shield from a carbon-ceramic composite material. 2. Thermal tests of specimens of the material / S.V. Reznik, P.V. Prosuntsov, K.V. Mikhailovskii, A.F. Kolesnikov, A.N. Gordeev // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2019. Vol. 92. No. 2. P. 306 – 313. DOI: 10.1007/s10891-019-01934-6 (0,5 п.л. / 0,3 п.л.).

21. Просунцов П.В., Резник С.В., Михайловский К.В. Трансформируемый экран из гибкого композиционного материала для защиты космического аппарата от малого космического мусора. Патент на полезную модель RU 186183 U1, 11.01.2019. Заявка № 2018133505 от 21.09.2018.

22. Mikhaylovskiy K.V., Reznik S.V., Prosuntsov P.V. Method for modeling the interaction between transformable shells of spacecrafts and small space debris objects // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2171. No. 1:030017. DOI: 10.1063/1.5133183 (0,375 п.л. / 0,3 п.л.).

23. Городецкий М.А., Михайловский К.В. Разработка методики проектирования теплонагруженных размеростабильных элементов конструкций из углепластика для космического аппарата дистанционного зондирования земли // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 159 – 165. DOI: 10.22363/2312-8143-2020-21-3-159-165 (0,4375 п.л. / 0,15 п.л.).

24. Барановски С.В., Михайловский К.В. Структурно-оптимизированная конструкция крыла из полимерных композиционных материалов. Часть 1.

Криволинейные силовые элементы // Ученые записки ЦАГИ. 2020. Т. 51. № 2. С. 79 – 86 (0,5 п.л. / 0,13 п.л.).

25. Барановски С.В., Михайловский К.В. Структурно-оптимизированная конструкция крыла из полимерных композиционных материалов. Часть 2. Направленная укладка волокон в слое // Ученые записки ЦАГИ. 2020. Т. 51. № 3. С. 67 – 77 (0,6875 п.л. / 0,18 п.л.).

26. Михайловский К.В., Городецкий М.А. Разработка методики определения лучистого теплообмена для платформ космических аппаратов в условиях полета на околоземных орбитах // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 3 (732). С. 62 – 70. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-3-62-70 (0,5625 п.л. / 0,25 п.л.).

27. Mikhaylovskiy K.V., Reznik S.V. Prediction and detection of primary microcracks in carbon fiber reinforced polymer under load // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1060. No 1: 012014. 8 p. DOI: 10.1088/1757-899X/1060/1/012014 (0,5 п.л. / 0,45 п.л.).

28. Baranovski S.V., Mikhaylovskiy K.V. Ultralight structurally optimized carbon fibre reinforced polymer composite wing designing based on parametric modelling and topology optimization // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1060. No 1: 012013. 8 p. DOI: 10.1088/1757-899X/1060/1/012013 (0,5 п.л. / 0,1 п.л.).

29. Городецкий М.А., Михайловский К.В., Резник С.В. Определение параметров трёхслойных композитных панелей для конструкции платформы космических аппаратов дистанционного зондирования земли // Космическая техника и технологии. 2022. № 1 (36). С. 36 – 45. DOI: 10.33950/spacetech-2308-7625-2022-1-36-45 (0,625 п.л. / 0,25 п.л.).

30. Резник С.В., Михайловский К.В. На новом этапе развития многоразовой ракетно-космической техники. В книге: XLVI Академические чтения по космонавтике. Сборник тезисов, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. В 4-х томах. Москва, 2022. Т. 1. С. 128 – 133 (0,375 п.л. / 0,18 п.л.).

31. Создание и валидация комплексной компьютерной модели изготовления рефлектора зеркальной космической антенны из полимерных композиционных материалов / П.В. Просунцов, К.В. Михайловский и др. // Решетневские чтения: материалы XXIX Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева. В 2-х частях. Красноярск, 2025. С. 220 – 222 (0,1875 п.л. / 0,05 п.л.).

32. Вай Ян.У., Михайловский К.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния панели из полимерных композиционных материалов при действии однократной ударной нагрузки и оценка областей появления дефектов // Вестник Московского авиационного института. 2025. № 1 (32). С. 112 – 123 (0,75 п.л. / 0,25 п.л.).