

Целью настоящей работы была разработка композиционных материалов с углеродной матрицей на основе новых марок отечественных углеродных волокон, внедрение в ответственные элементы перспективных ракет и модернизации востребованной в настоящее время ракетно-космической техники (РКТ).

В настоящее время механизмы работы композиционных материалов с углеродными матрицами, особенно в условиях экстремальных воздействий являются малоизученными. Композиционные материалы с углеродной матрицей - это широкий класс жаростойких, радиационно-стойких композиционных материалов, представленный вариацией структуры (2D, 3D, nD) и технологии получения армирующей структуры композита (намоткой, сборкой, выкладкой, взвешиванием и уплотнением в потоке среды), выбором технологии получения углеродной матрицы (жидкофазной, газофазной).

Работы по исследованию механизмов работы и разрушения таких материалов в условиях высокоскоростных воздействий, в том числе с учетом пористости, структуры (направлений и размера периодической ячейки армирующего каркаса материала), практически отсутствуют. Данное обстоятельство значительно осложняет работу конструкторов и технологов при выборе и проектировании деталей из УУКМ в ответственных узлах РКТ, гражданских и военных самолетов.

Особенность использования таких материалов заключается в том, что для конкретного изделия необходимо создать свой, зачастую уникальный, материал, то есть подобрать соответствующие компоненты, выбрать требуемую условиями нагружения схему расположения армирующих наполнителей, применить определённый технологический процесс изготовления.

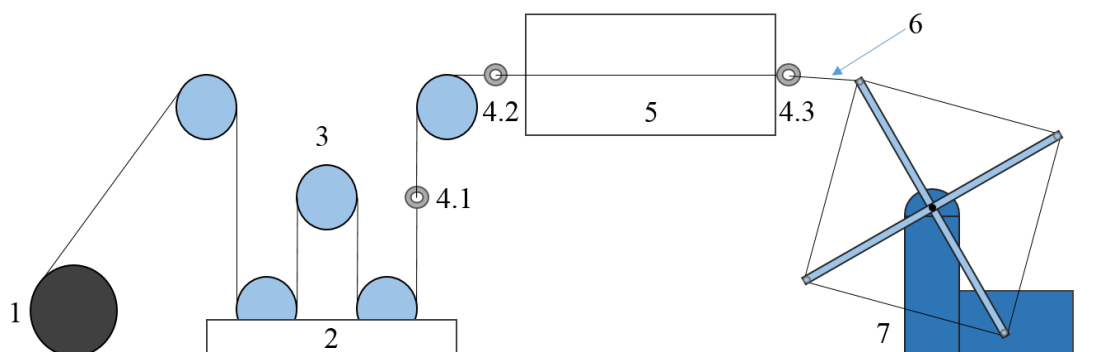
Для достижения цели в период с 2019 по 2023 годы выполнены исследования разрабатываемых композиционных материалов на каждом этапе жизненного цикла от исходных компонентов, структуры, свойств и влияющих на них технологических параметров, условий внешних тепловых воздействий, верификации методов испытаний, разработки подходов к проведению испытаний, имитирующих воздействие высокоскоростных потоков, до физико-химических методов повышения эрозионной стойкости композитов.

Фундаментальные основы оценки стадийности поврежденности материалов при термоударе

Фундаментальные основы оценки стадийности поврежденности как специального типа критических явлений в материалах с дефектами впервые установлены в работах сотрудников Лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред УрО РАН (ПФИЦ УрО РАН) и положены в основу методологии разработки моделей деформирования и разрушения материалов при интенсивных воздействиях; создания экспериментальных комплексов, позволяющих проведение широкодиапазонных экспериментов (квазистатических, усталостных, динамических, ударно-волновых) с использованием средств регистрации высокого пространственно-временного разрешения; структурных исследований, идентифицирующих параметры моделей, отвечающих за стадийность развития поврежденности.

Применительно к керамическим и углеродным композиционным материалам впервые развиты подходы по оценке «диссипативной емкости» на основе данных о пространственно-временной динамике фрагментации. Перспективность данного метода определяется возможностью установления корреляций между структурными свойствами, механизмами, стадийностью разрушения и «диссипативной емкостью» конструкций в условиях экстремальных воздействий.

Технология получения углеродных стержней с применением перспективного углеродного волокна УМТ



1 – шпулярник с бобиной углеродного волокна; 2 – пропитывающая ванна; 3 – направляющие ролики; 4.1, 4.2 и 4.3 – отжимающая, направляющая и формирующая фильеры; 5 – сушильная камера; 6 – углеродный стержень; 7 – наматывающее устройство типа «мельница»

Рисунок 1 – Схема установки изготовления углеродных стержней

Для оптимизации технологии производства углеродных стержней, удовлетворяющих требованиям для их дальнейшего использования в армирующих структурах, был разработан и использовался опытный стенд, схема которого представлена на рисунке 1.

На основании опыта, имеющегося в АО «НИИГрафит», а также по результатам изготовления пробных партий УС и анализа плотности упаковки отечественных УН в стержневые структуры определены требуемые оптимальные значения технических параметров УС (таблица 1).

Таблица 1– Технические параметры углеродных стержней

Диаметр, мм	Эллипсность, %, не более	Устойчивость, Н, не менее
0,92 ± 0,07	8	15

Данные значения являются необходимыми и достаточными для перехода к следующей операции технологического процесса производства УУКМ – изготовлению армирующих каркасов.

На сегодняшний день АО «НИИГрафит» выпускает стержни двух типоразмеров со средним диаметром 0,9 и 1,17 мм. Эти диаметры стержней выбраны на основании нескольких факторов: по оптимальным параметрам производительности, трудоемкости их изготовления и качественному параметру плотности сборки армирующего каркаса, а также по достижению соответствующих характеристик конечного УУКМ.

Для полноценной оценки целесообразности применения различных отечественных углеродных наполнителей, в том числе на основе отечественных ПАН-прекурсоров, проведено сравнение стоимости материалов данного типа (таблица 2).

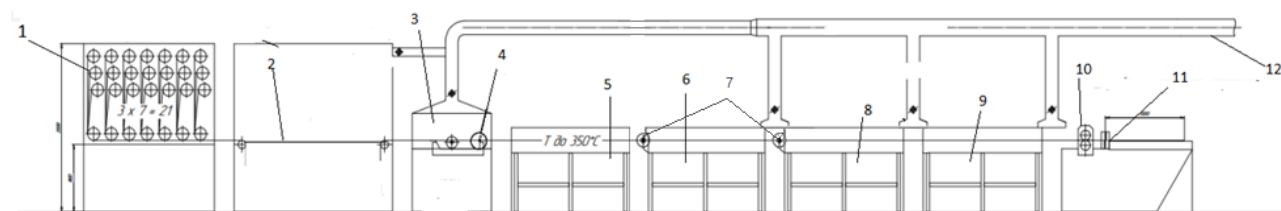
Таблица 2 – Стоимость отечественных углеродных наполнителей

Волокно	UMT49-12K-EP	UMT49S-12K-EP	UMT42S-3K-EP (A)	UMT55-12K-EP (A)	УКН/5000	ВМН-4
Стоимость, руб./кг, без НДС	5 120,00	20 075,00	21 492,00	4 000,00	30 462,00	38253,58

Как видно из таблицы 2, стоимость углеродных волокон марок UMT ниже стоимости углеродных наполнителей ВМН-4 и УКН/5000, что, безусловно, показывает экономическую целесообразность разработки технологии изготовления

УС из волокон марок УМТ и последующего их использования в качестве сырьевых материалов для серийной продукции из УУКМ.

Применение новых сырьевых материалов (углеродного волокна марок УМТ и эпоксидного связующего) для изготовления углеродных стержней потребовало создания новой производственной линии, отработки технологических режимов и мероприятий по контролю качества. Результатом проведенной работы стала разработка новой технологической операции ТП. На рисунке 3 представлена схема линии изготовления углеродных стержней из волокон марок УМТ и эпоксидного связующего.



1 – шпулярник; 2 – нить углеродная; 3 – ванна пропиточная; 4 – блок отжимных фильер; 5 – печь нагревательная № 1; 6 – печь нагревательная № 2; 7 – блок формирующих фильер; 8 – печь нагревательная № 3; 9 – печь нагревательная № 4; 10 – механизм протяжки; 11 – механизм резки; 12 – система вытяжки

Рисунок 3 – Схема линии изготовления стержней

Получение углерод – углеродных материалов на базе новых перспективных углеродных волокон УМТ

В рамках работы изготовлены углеродные стержни на базе перспективного волокна УМТ 49 - 12К – ЕР (СТО 30371716-006-2017) с применением раствора отечественного эпоксидного низковязкого связующего Т20-60 (ТУ 2257-053-59846689-2016) и изопропилового спирта.

Углерод-углеродный композиционный материал типа 4Д имеет каркас, состоящий из четырех семейств прямолинейных армирующих элементов - стержней. Из анализа структуры данного композита следует, что по свойствам симметрии материал относится к гексагональному классу. Схема армирования УУКМ типа 4Д показана на рисунке 4, где каркас материала состоит из четырех семейств параллельных стержней. Структура материала 4Д обеспечивает

достаточную анизотропию свойств будущего УУКМ путем варьирования укладки армирующих стержней.

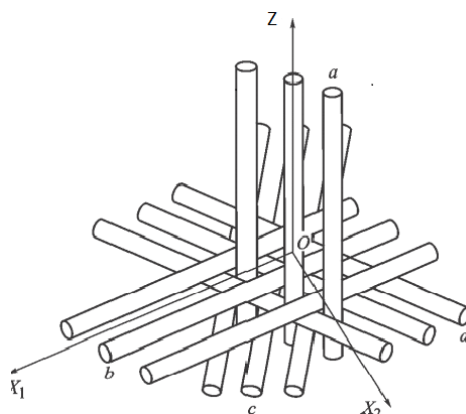


Рисунок 4 Схема армирования УУКМ типа 4Д.

Система четырех нитей позволяет получать композиционные материалы с достаточно высокими показателями по объемному заполнению волокнистым материалом общего объема композита. Данная схема армирования является одной из наиболее рациональной, с точки зрения изотропии свойств, в сравнении с другими пространственными расположениями.

Исследование физико-механических свойств УУКМ при температурах до 3000 °С

Для прогнозирования работоспособности, применимости и расчета ресурса конструкций перед исследователями и разработчиками стоит задача определения эффективных механических и теплофизических характеристик разрабатываемых материалов именно в диапазоне температур эксплуатации 20 – 3000 град. С конечных изделий, в том числе в окислительных средах и потоках. При этом особенно важным условием, является необходимость определения упруго-деформационных характеристик с высокой точностью, в широком интервале температур.

Полученные температурные зависимости предела прочности модуля упругости и предельной деформации, многомерно армированных УУКМ при сжатии в диапазоне температур 20 – 3000 °С, показывает, что в диапазоне температур 20-1500 °С деформирование носит линейный характер, а при температурах выше 1500 °С – слабо нелинейный характер. Явная нелинейность, проявляемая при 2500 °С, обусловлена появлением необратимых деформаций в

материале – пластическая деформация углеродных волокон стержней сопровождались растрескиванием матрицы как внутри стержней, так и матрицы между стержнями (рисунок 5).

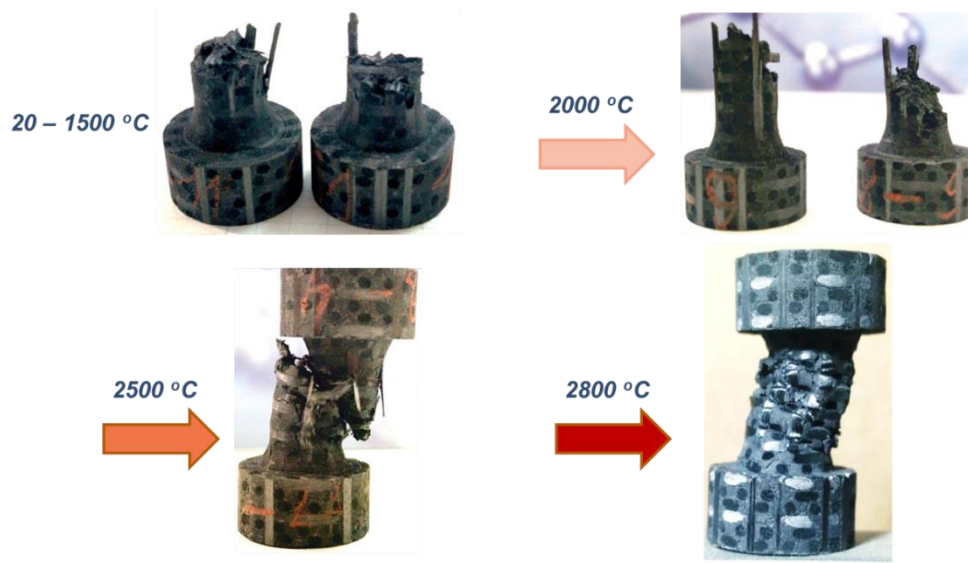


Рисунок 5 – Характер разрушения многомерно армированных УУКМ при сжатии в диапазоне температур 20 – 3000 °С

При подборе сырьевых компонентов, например как применение новых углеродных волокон марок УМТ полученные зависимости позволяют обосновать сохранение конструкции термонагруженных узлов конечных изделий либо необходимость внесения корректировок в конструкцию узлов конечных изделий.

Технологические процессы формирования углерод-углеродных композиционных материалов на базе мотальных паковок специального назначения.

Разработка теоретических основ и технологических процессов армирования углерод-углеродных композиционных материалов, формируемых на базе намоток мотальных паковок с максимально возможным коэффициентом заполнения, структура которых была бы устойчива к сдвигу и расслоению при эксплуатации конечных изделий в экстремальных условиях

Проведенные исследования позволили решить ряд технологические проблем производства УУКМ, а именно: реализация договора по поставке РИТЭГ, с применением структур сомкнутых намоток с высоким коэффициентом заполнения заготовок углеродным армирующим компонентом и перспективного углеродного волокна производства УМТ.

Удалось сформировать намоткой армирующие заготовки композиционных материалов, таких как армирующие заготовки специального назначения и объемные композиты из углеродных нитей. Результаты работы внедрены; на предприятиях ГК «Росатом», АО «НИИГрафит»;

Практическая реализация разработанной новой технологии при изготовлении источника автономного электропитания - РИТЭГ

В работе впервые предложена и реализована технология изготовления РИТЭГ с применением в качестве армирующего компонента сомкнутых намоток с максимальным коэффициентом заполнения волокнистым материалом (более 0,7).



Рисунок 6 – Фото заготовок РИТЭГ с применением сомкнутой намотки нити

Проведенные теоретические исследования структур намоток для формирования армирующего компонента углерод – углеродного композиционного материала с максимально возможным коэффициентом заполнения волокнистым материалом общего объема композита позволило сократить количество переделов при изготовлении источника автономного электропитания - РИТЭГ (рисунок 6) с применением перспективного углеродного волокна УМТ - 12К–ЕР, тип текстильной структуры – сомкнутая намотка. Это позволило исключить два предварительных технологических цикла пропитки и карбонизации и обеспечило получение конечного продукта с заданными свойствами.

Применение технологии намотки позволяет использовать любой тип углеродного наполнителя в том числе и перспективные волокна УМТ с сохранением его ФМХ за счет меньшего числа истирающих воздействий в сравнении с ткаными структурами.

Повышение эксплуатационных характеристик УУКМ за счет формирования керамической защиты

Проведены исследования способов формирования керамической защиты от окисления в воздушных потоках углеродных армированных материалов. Исходные углеродные материалы получали уплотнением углеродной матрицы по изостатической технологии. Высокотемпературные изостатические технологии формирования углеродной матрицы основаны на пропитке расплавом углеводородного прекурсора пористой структуры будущей детали.

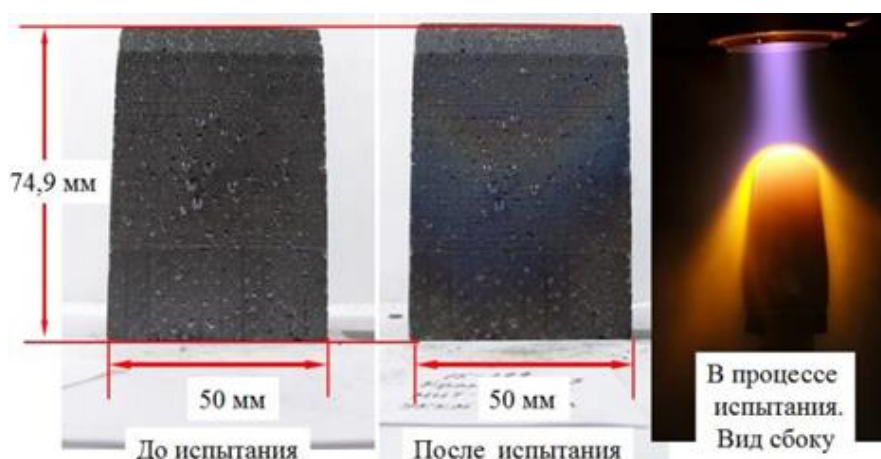


Рисунок 7 – Общий вид испытанных в скоростном потоке образцов УККМ в форме кромок (УККМ-4Д на основе углеродного волокна УКН-5000 и Si)

Разработанные материалы двумерного и многомерного армирования использованы при создании высокотемпературных конструкций. Сборку отдельных деталей из объемно и двумерно армированных материалов в узлы проводили по разработанной технологии, которая так же основа на формировании керамической матрицы в объеме шва соединения.

Испытания в скоростном потоке воздушной среды (рисунок 7) проведены при температуре поверхности ~ 1400 °С непрерывно в течение 600 с. Все образцы, как УУКМ, так и УККМ не изменяли заданную аэродинамическую форму.

Установка для экспрессного определения термохимической стойкости УУКМ в высокоэнтальпийном потоке газов

В 2022 году была поставлена задача в сжатые сроки разработать и создать установку для определения термохимической стойкости образцов УУКМ и сравнения образцов на ранее использовавшемся сырье и новом для подтверждения сохранения характеристик материалов, используемых в ответственных частях

ракетно-космической техники. По результатам работ была разработана и создана экспериментальная установка для исследования теплозащитных свойств материалов в высокотемпературном потоке газа (ВТГГ-1). Вид установки во время испытания представлен на рисунке 8.

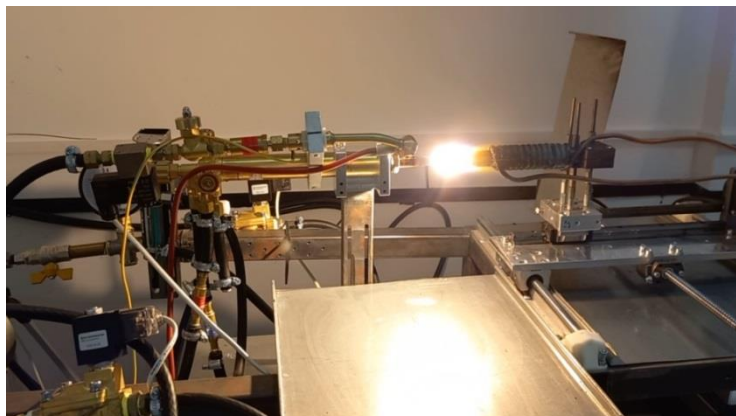


Рисунок 8– Испытание образца

Проведённые испытания на установке ВТГГ-1 образцов материалов 4КМС-Л на волокнах UMT49, UMT55, UMT42S, и UMT49S, а также Десна Т-1 на волокнах UMT42S и UMT49S показали, что при сравнении абсолютного массового уноса образцов и абсолютной скорости массового уноса материалов на волокне ВМН-4 и УКН/5000 и материалов на новых волокнах UMT42, UMT49, UMT49S и UMT55 унос либо остаётся на том же, в пределах погрешности измерений, значении, либо уменьшается.

Социально-экономический эффект.

Выполненная работа позволила применить разработанные композиционные материалы в востребованных изделиях ракетно-космического комплекса. При этом удалось нарастить объёмы производства более чем в 30 раз и обеспечить выпуск продукции в 2023 году на сумму 1.4 млрд. рублей с контрактацией в 2024 до 2.0 млрд. рублей. Внедрение технологий и увеличение объёмов производимой продукции позволило создать 65 новых рабочих мест в ЗАТО г. Заречный и 25 новых рабочих мест в городе Москва. Увеличение объёмов производства позволило повысить в 2023 году среднюю заработную плату работникам ЗАТО г. Заречный более чем на 20%.

Разработанная технология в 2023 году позволила достигнуть 90 процентного выхода годной продукции, в том числе благодаря новым методикам межоперационного технологического контроля.