

На правах рукописи



ЕЛАКОВ Александр Борисович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ НЕТКАНОГО
ОКИСЛЕННОГО ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛА**

Специальность 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Хорошо известно широкое применение графитов в высокотемпературных изделиях из-за своей жаропрочности и однородности структуры и свойств (пресс-формы для горячего прессования, тигли, вкладыши критического сечения сопла и др.). Однако графиты из-за отсутствия армирования не обладают высокими прочностными свойствами и не являются стойкими к термоудару. Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), обладая более высокой прочностью, имеют низкую структурную однородность из-за крупных ячеек армирования, что определяет их относительно высокий эрозионный унос при интенсивном термохимическом воздействии. Эти материалы производятся на основе дорогостоящих углеродных волокон, а технологический процесс их получения занимает несколько месяцев.

Современные тенденции развития диктуют необходимость все более широкого использования нетканых материалов в производстве УУКМ. Французская фирма Spesma применяет в производстве каркасов Novoltex слои нетканого окисленного полиакрилонитрила (ПАНа), стоимость которого в 8-10 раз меньше углеродного волокна, используя практичную и производительную иглопробивную технологию. Каркас Novoltex состоит из слоев углеродных лент, перемежающихся со слоями окисленного нетканого ПАНа, армированных теми же волокнами ПАНа, протянутыми иглами с зазубринами из предыдущих слоев. Промышленное производство конструкционных УУКМ с использованием нетканых наполнителей в Российской Федерации отсутствует.

Актуальным представляется создание углерод-углеродного композиционного материала, обладающего прочностными свойствами УУКМ и однородной измельченной структурой графитов, сочетая для его получения недорогое нетканое сырье с простотой и производительностью иглопробивной технологии. Это открывает новые возможности для изготовления сложнопрофилированных деталей типа остроконечных кромок высокоскоростных летательных аппаратов, тонких электродов ионно-оптических систем, пресс-форм для горячего прессования, а также широкие возможности для мехобработки.

Из актуальности вытекает цель и сформулированы задачи диссертационной работы.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы являлась разработка базовой технологической схемы изготовления углерод-углеродного композиционного материала на основе нетканого окисленного полиакрилонитрила (ПАНа), сочетающего в себе прочностные свойства традиционных УУКМ с однородной измельченной структурой графитов.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

- проведен анализ научной, технической и патентной литературы в области углеродных материалов, сырья и технологии их получения;

- исследованы возможности применения окисленного ПАНа для формирования массивных углеродных преформ и УУКМ на их основе; экспериментально исследована возможность получения углеродных каркасов из иглопробивных ПАН-заготовок с использованием прессования; определена оптимальная плотность спрессованных каркасов; разработаны технологические режимы для перевода каркаса из окисленного ПАН в углеродное состояние с учетом последствий экзотермического эффекта;

- на основе способа намотки нетканого холста на оправку разработана технология получения цилиндрического иглопробивного каркаса (ИПК); проведено сравнение двух технологических вариантов (с радиальным иглопробиванием и без него) при формировании цилиндрических углеродных каркасов на основе окисленного ПАН;

- методами математического моделирования проведен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния при намотке нетканого ПАН-холста на цилиндрическую металлическую оправку в обоих вариантах технологии;

- исследована кинетика уплотнения углеродных ИПК углеродной матрицей на основе кокса каменноугольного пека;

- определен комплекс физико-механических, теплофизических свойств и исследована микроструктура получаемых каркасов и УУКМ на их основе;

- проведено сравнение эрозионной стойкости высокоплотных УУКМ на нетканой основе и эрозионной стойкости известных марок УУКМ.

Научная новизна

1. Показана принципиальная возможность получения конструкционных мелкоячеистых УУКМ из нетканого окисленного ПАНа путем применения иглопробивной технологии в сочетании с прессованием на стадии формирования полимерных заготовок и дальнейших термообработок для получения армирующего углеродного каркаса с дальнейшим уплотнением углеродной матрицей жидкофазным или газофазным способами.

2. Установлен интервал значений объемной плотности прессования заготовок каркасов (от 0,70 до 0,90 г/см³), при котором достигается конструкционная прочность каркаса без структурных макродефектов – трещин, расслоений. Выявлено, что меньшая плотность заготовки приводит к потере устойчивости слоев и не позволяет достичь конструкционной прочности каркаса, а бóльшие значения плотности приводят к перепрессовке, в результате которой затрудняется отвод летучих при термообработке. Определены закономерности прессования применительно к различным направлениям относительно укладки иглопробитых холстов. Установлено, что прессование при приложении усилия сжатия по нормали к плоскости укладки полимерных холстов происходит легче и сопровождается бóльшими перемещениями, чем в случае приложения усилия сжатия параллельно плоскости укладки за счет первоначального уплотнения в первом случае за счет ликвидации

межслоевых воздушных прослоек, а на последующей стадии – за счет гибкой деформации относительно тонких армирующих волокон, связывающих слои монохолстов после иглопробивания.

3. Показано, что экзотермический эффект при термообработке уплотненного массивного каркаса из окисленного ПАНа проявляется уже при температурах (150-160) °С, в отличие от литературных данных, полученных на ПАН-жгуты, где его влияние начинается при температурах (190-205) °С. Проявление экзотермического эффекта при относительно невысоких температурах может привести к интенсивному внутреннему разогреву каркаса и пережогу волокна.

4. Предложена математическая модель напряженно-деформированного состояния полимерного холста при его намотке на цилиндрическую стальную оправку (аналитическая модель механики фронтально растущего тела), показывающая, что радиальное армирование полимерного цилиндрического каркаса приводит к снижению коэффициента Пуассона и позволяет добиться устойчивости слоев намотанного холста при сжатии и термообработке каркаса.

5. В результате исследования кинетики насыщения выявлено, что углеродные преформы на основе нетканого окисленного ПАНа имеют более высокую скорость уплотнения матрицей на основе кокса каменноугольного пека по сравнению со стержневым каркасом за счет более измельченной структурной ячейки нетканого каркаса, позволяющей удерживать расплавленный пек благодаря капиллярному эффекту.

6. Определен комплекс физико-механических и теплофизических характеристик полученных УУКМ с двумя типами матриц (кокс пека, пиролитический углерод), получены сравнительные результаты испытаний на газоплотность и эрозионную стойкость.

Практическая значимость

Разработана технологическая схема изготовления мелкоячеистых конструкционных УУКМ на основе нетканого иглопробивного каркаса Ипресскон[®] из окисленного ПАНа, позволяющая в несколько раз уменьшить сроки полного технологического цикла производства УУКМ по сравнению с традиционными каркасами на нитяной основе. Получены конструкционные УУКМ на основе углеродного каркаса Ипресскон[®] с двумя типами матриц (кокс каменноугольного пека и пиролитический углерод), из которых изготовлены массивные заготовки изделий типа втулки с внешним диаметром 175 мм и типа блока с длиной одной из сторон около 700 мм. Из полученных УУКМ изготовлены макетные образцы вкладышей критического сечения сопла и газодинамического руля. Проведены их успешные испытания на эрозионную стойкость.

Физико-механические и теплофизические свойства полученных материалов позволяют использовать изделия из УУКМ на нетканой основе взамен графита и

традиционных УУКМ для теплонагруженных деталей и узлов. В ОАО «Композит» используется цилиндрическая силовая обечайка диаметром Ø160 мм пресс-формы горячего прессования. Благодаря достигнутой шероховатости поверхности (R_a – от 0,6 до 0,8) после полировки и высокой газоплотности полученных конструкционных УУКМ определена возможность их использования для тонких или сложно профилированных изделий. Изготовлен и испытан на стенде НИИ ПМЭ МАИ ускоряющий электрод ионно-оптической системы высокочастотного ионного двигателя малой мощности с толщиной стенки 1,5 мм; изготовлен и испытан на стенде теплозащитный перфорированный экран (толщина стенки 2,0 мм, количество отверстий - 936) теплонагруженного узла перспективного изделия ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». По указанным изделиям получены акты внедрения. Получен патент РФ № 2620810 на способ изготовления пористого углеродного каркаса – основы композиционного материала. Получено свидетельство № 637135 на товарный знак каркаса на нетканой основе марки Ипресскон®.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов диссертационной работы обеспечена применением стандартных и современных методов исследований, апробированных методов механических испытаний, а также большим объемом экспериментального материала с использованием статистической обработки результатов измерений. Научные положения и выводы по работе имеют теоретическое обоснование и не противоречат известным научным представлениям и результатам. Достоверность результатов исследований и выводов подтверждена результатами производственных испытаний.

Апробация работы

Результаты работы были доложены на

XVII Ежегодной научной конференции отдела полимеров «Полимеры-2016», ФГБУН Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, февраль 2016 г.; VI Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества», г. Суздаль, октябрь 2016 г.; XVIII Ежегодной научной конференции отдела полимеров «Полимеры-2017», ФГБУН Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, февраль 2017 г.; 7-ой Всероссийской конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф.Образцова и Ю.Г.Яновского, Москва, ноябрь 2017 г.; XLII Академических чтениях по космонавтике «Королевские чтения», Москва, январь 2018 г.

На защиту выносятся:

1. Технология получения конструкционных мелкоячеистых УУКМ на основе нетканого окисленного полиакрилонитрила с применением иглопробивной технологии и прессования.

2. Закономерности формирования и изменений микроструктуры и открытой пористости объемных заготовок по стадиям технологических переделов.

3. Экспериментальная оценка экзотермического эффекта в уплотненном каркасе из окисленного ПАНа в процессе трансформации в углеродный каркас.

4. Математическая модель напряженно-деформированного состояния при намотке холста на цилиндрическую металлическую оправку (аналитическая модель механики фронтально растущего тела), сравнительный анализ двух вариантов формирования цилиндрической преформы.

5. Результаты экспериментального исследования физико-механических и теплофизических характеристик полученных КМ с двумя типами матриц и результаты их испытаний.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 печатных научных работ, в том числе 1 патент РФ и 4 статьи в научных журналах, рекомендуемых ВАК РФ.

Личный вклад автора

Диссертация является законченной научной работой, в которой обобщены результаты исследований, полученные лично автором и в соавторстве. Основная роль в получении и обработке экспериментальных данных, анализе и обобщении результатов принадлежит автору работы. Обсуждение и интерпретация полученных результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами публикаций. Основные положения и выводы диссертационной работы сформулированы автором.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов и списка литературы. Содержание диссертации изложено на 144 страницах, иллюстрировано 80 рисунками и 16 таблицами. Список цитируемой литературы включает 150 источников. Приводится 3 приложения общим объемом 4 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследований, изложена научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой аналитический обзор научной, технической и патентной литературы, посвященный существующим в настоящее время углеродным высокотемпературным материалам, их различиям и особенностям, обуславливающих различные области применения (высокоплотные графиты, УУКМ на тканно-нитяной и стержневой основе, УУКМ на основе иглопробивных каркасов, углеродные войлоки). Приведены их основные свойства и особенности структуры, рассмотрены

технологические схемы изготовления, дан анализ их достоинств и недостатков. Рассмотрены особенности нетканых материалов (поверхностная плотность, извитость, штапельирование), возможности их использования для УУКМ и влияние на механические характеристики.

Показаны особенности и преимущества иглопробивной технологии и ее возможности применительно к углеродным материалам войлочного типа, в том числе гидроструйная обработка (Spunlace-метод), как разновидность иглопробивания.

Рассмотрены особенности ПАН-волокон как основного прекурсора для получения углеродных волокон. Показано строение молекулы ПАНа, приведены химические реакции, сопровождающие окисление ПАН-волокна, освещены особенности его перевода из полимерного в неорганическое состояние, в том числе непрерывных нитей, характер изменения молекулярной структуры, возникающие при этом трудности и эффекты.

Глава заканчивается выводами и постановкой задачи.

Во второй главе охарактеризованы исходное сырье и материалы, методики исследований и оборудование, используемые в работе.

В качестве исходного материала для формирования полимерных заготовок каркасов использовали нетканое иглопробивное термостойкое полотно марки «ОКСИПАН» ТУ 8397-002-45680943-2010 поверхностной плотностью (220-260) г/м² на основе штапельных (нарезанных на отрезки 50-60 мм) волокон окисленного полиакрилонитрила (ПАНа) марки Ругоп[®] линейной плотностью 2,2 dtex, средней извитости, механически пробитое стальными иглами или тонкими (диаметром 100-150 мкм) водяными струями высокого давления при помощи машины гидроструйной обработки ГЖ-300-1 (Spunlace-метод), промышленно производимое в настоящее время ООО «Ниагара». Процессы, протекающие в холсте «ОКСИПАН» при его нагреве, исследовали методом ДСК-калориметрии на дифференциальном сканирующем калориметре марки DSC 214 Polyma фирмы «Netzsch». Изменения структуры используемого в работе волокна в процессе его термостабилизации исследовали методом ИК-спектроскопии на Фурье-спектрометре Bruker Optics FT-IR Tensor 27. Анализ концентрации парамагнитных центров (ПМЦ) проводился методом электронного парамагнитного резонанса на оригинальной установке ООО «Углекхимволокно».

Намотку нетканого холста «ОКСИПАНа» для получения крупноразмерного тубулярного каркаса проводили при помощи тубулярной иглопробивной машины DIL0. Полимерные заготовки каркасов макетных образцов уплотняли прессованием на гидравлическом прессе марки 100 ТОДБ 2430 номинальным усилием 1000 кН. Крупногабаритные цилиндрические заготовки уплотняли на гидравлическом прессе марки 2238 номинальным усилием 5600 кН в закрытой пресс-форме с внутренним диаметром матрицы 190 мм. Перевод полимерного каркаса в неорганическое состояние

(карбонизацию) проводили в муфельной электропечи сопротивления ТК-64 с микропроцессорным контроллером «ТЕРМО-РН-01.01» в неокислительной среде (коксовая засыпка), температуру измеряли хромель-алюмелевой термопарой. Высокотемпературный отжиг углеродных каркасов проводили в высокотемпературной вакуумной электропечи СНВГ 16/21, температуру измеряли пирометром марки Имрас ISQ 5.

Испытания на растяжение элементарной углеродной нити в Ипрессконе проводили на машине Zwick/Roell z005 по ГОСТ 32667. Определение предела прочности при растяжении и модуля упругости монохолста «ОКСИПАНа» проводили на разрывной машине Instron 3365 по ГОСТ 29104.4.

Открытую пористость определяли при помощи эталонного контактного поромера Porotech 3,2. Наблюдение микроструктуры исследованных в работе материалов проводили на оптическом микроскопе «Альтами МЕТ-1М» с системой видеофиксации изображения и сканирующем электронном микроскопе JSM-6610 LV фирмы «JEOL», оснащенным системой локального рентгеноспектрального микроанализа. Исследование структуры углеродных каркасов, а также полученных на их основе УУКМ на предмет отсутствия скрытых макродефектов – трещин или расслоений – проводили методом рентгеновской томографии на рентгеновском компьютерном томографе ХТН 225+320 LC фирмы «METRIS».

Уплотнение полученных углеродных каркасов проводили двумя различными типами углеродных матриц: коксом среднетемпературного каменноугольного пека ГОСТ 10200 жидкофазным способом с использованием промышленной установки пропитки пеком и карбонизатора АДКА 103/105-60-1100; пироуглеродом – из газовой фазы метана термоградиентным способом на промышленной установке «Агат-3,2», расчетное время насыщения – 270 ч при $T=1030^{\circ}\text{C}$ (при толщине стенки каркаса около 67 мм скорость осаждения пироуглерода – 0,25 мм/ч).

Теплоэрозионную стойкость полученных высокоплотных УУКМ определяли на базе оборудования ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»: на плазмотроне «Звезда» в воздушно-спиртовой смеси по собственной методике со следующими параметрами: температура торможения смеси – (3450-3580) К; давление торможения 1,8 - 2,3 МПа; расход спирта – (0,05-0,08) кг/с; расход воздуха – (0,260 - 0,276) кг/с; соотношение спирта и суммарного расхода газовой смеси – (15-25) %; время испытаний – от 15,1 с до 18,1 с; температура стенки в области критического сечения вкладыша – около 2400°C ; на экспериментальной установке на базе твердотопливного газогенератора 2ЭД43, установленной на стенде УТТ, согласно программе и методике проведения испытаний (огневых) макетных образцов №6-04/33 от 10.03.2017 при следующих условиях: марка топлива Т9БК8; длительность воздействия потока – до 10 с; температура продуктов

сгорания – 3450 К; давление в камере сгорания – 5,6-5,7 МПа; давление разрыва шпилек – до 10,0 МПа; номинальный расход топлива – 0,9 кг/с; расход рабочего газа – (5,7±0,2) кг/с.

Физико-механические (ФМХ) и теплофизические характеристики (ТФХ) высокоплотных образцов УУКМ определяли на следующем испытательном оборудовании по стандартным методикам (табл.1).

Таблица 1 - Оборудование и методики по определению ФМХ и ТФХ

Характеристика	Оборудование	Методика
Предел прочности при растяжении и модуль упругости	Испытательная машина Zwick 1474, Zwick 1464, экстензометр Schenck №437	ОСТ 92-1459-77, ОСТ 92-1461-77
Предел прочности при сжатии	Испытательная машина Zwick 1474, динамометр Zwick 1474 100 кН	ОСТ 92-1460-77
Теплопроводность при 50°C	Прибор «А-26М»	МВИ №7443-1-85
ТКЛР в интервале температур от 20 до 400°C	Термомеханический анализатор «Q-400 EM»	ГОСТ 32618.2-2014
Газопроницаемость	Стенд измерения газопроницаемости	Методика № 932-0226-97-2015

В третьей главе исследованы возможности применения окисленного ПАНа при формировании массивных каркасов для последующего получения УУКМ, его поведение при термообработках, особенности микроструктуры на различных технологических стадиях; представлены технология получения однородного полимерного каркаса из «ОКСИПАНа» и армирующего углеродного каркаса на его основе; исследованы механические свойства при растяжении полученных элементарных углеродных волокон.

Исследовано поведение используемого в работе холста «ОКСИПАН» при нагреве до температуры 350 °С методом ДСК-калориметрии. Результаты исследования не показали выделения тепла до температур (220-250) °С. Сравнение с литературными данными свидетельствует о том, что используемый в работе «ОКСИПАН» имеет степень окисления между 75 и 100%.

Однако по результатам ИК-спектроскопии используемого в работе исходного волокна, выявлена интенсивность пиков на полосах поглощения (2870-2930) см⁻¹, относящаяся к структурной группе -С-Н-, и на (2241-2243) см⁻¹, соответствующая колебаниям связи в нитрильной группе -C≡N-, что свидетельствует о неполном прохождении как реакций циклизации нитрильных групп, так и дегидрагенизации после предварительного окисления исходного (белого) ПАНа.

Результаты ИКС подтверждаются анализом концентрации парамагнитных центров (ПМЦ), проведенным методом электронного парамагнитного резонанса (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнение свойств исходного волокна для «ОКСИПАНа» и штатного окисленного ПАН-жгута, производимого в ООО «Саратоворгсинтез»

№ п/п	Наименование образца	Гидростатическая плотность, г/см ³	ПМЦ [R]·10 ¹⁷ , спин/г
1	Исходное штапельированное ПАН-волокно Pylon [®]	1,37	4,7
2	Окисленный ПАН-жгут («Саратоворгсинтез»)	1,39	23,0

Как видно из таблицы, плотность 1,37 г/см³ и значение ПМЦ – 4,7 характеризуют исходное сырье как недоокисленное.

Следует особо отметить, что все закономерности поведения ПАН при его переводе в углеродное волокно исследованы ранее только для комплексных нитей при обеспечении постоянного натяжения и обдува. Исследование поведения консолидированного массива ПАН-волокон при его трансформации в углеродный каркас проводилось впервые.

На основе холста «ОКСИПАН» способом нетканых технологий получены массивные полимерные иглопробивные заготовки в виде плит различной толщины и полых цилиндров с объемной плотностью около 0,2 г/см³. Поскольку для армирующего углеродного каркаса конструкционного композита плотность составляет не менее (0,5-0,6) г/см³, необходимо дальнейшее уплотнение полимерного каркаса, которое проводилось методом прессования на предварительно прогретом прессе. Возможность его использования обусловлена присутствием в штапельных волокнах ПАНа замасливателя типа этоксилата жирных спиртов для обеспечения их расчеса, который, подплавляясь, скрепляет ПАН-волокна после охлаждения, что подтверждено исследованием микроструктуры методом сканирующей электронной микроскопии. Экспериментально установлены технологические параметры прессования в закрытой пресс-форме: температура – (150-160) °С, скорость нагрева – до 50 °С /ч, продолжительность нагрева зависит от массы заготовки, находясь в пределах от 40 до 120 мин. Определен интервал значения плотности заготовок спрессованного каркаса (от 0,7 г/см³ до 0,9 г/см³), при котором обеспечивается устойчивость слоев и не возникает трещин и расслоений, что подтверждено исследованием структуры методом рентгеновской компьютерной томографии.

Разработан способ перевода спрессованного массива штапельных ПАН-волокон в углеродное состояние для получения бездефектного армирующего углеродного каркаса. Известно, что в процессе карбонизации молекулы ПАНа претерпевают превращения, сопровождающиеся отводом летучих соединений и значительным тепловыделением, приводящим к пережогу углеродного волокна. Для оценки влияния экзотермического эффекта в спрессованном образце проведен эксперимент по сопоставлению разности температур в реакторе, на крае и в центре массивного образца (рисунок 1).

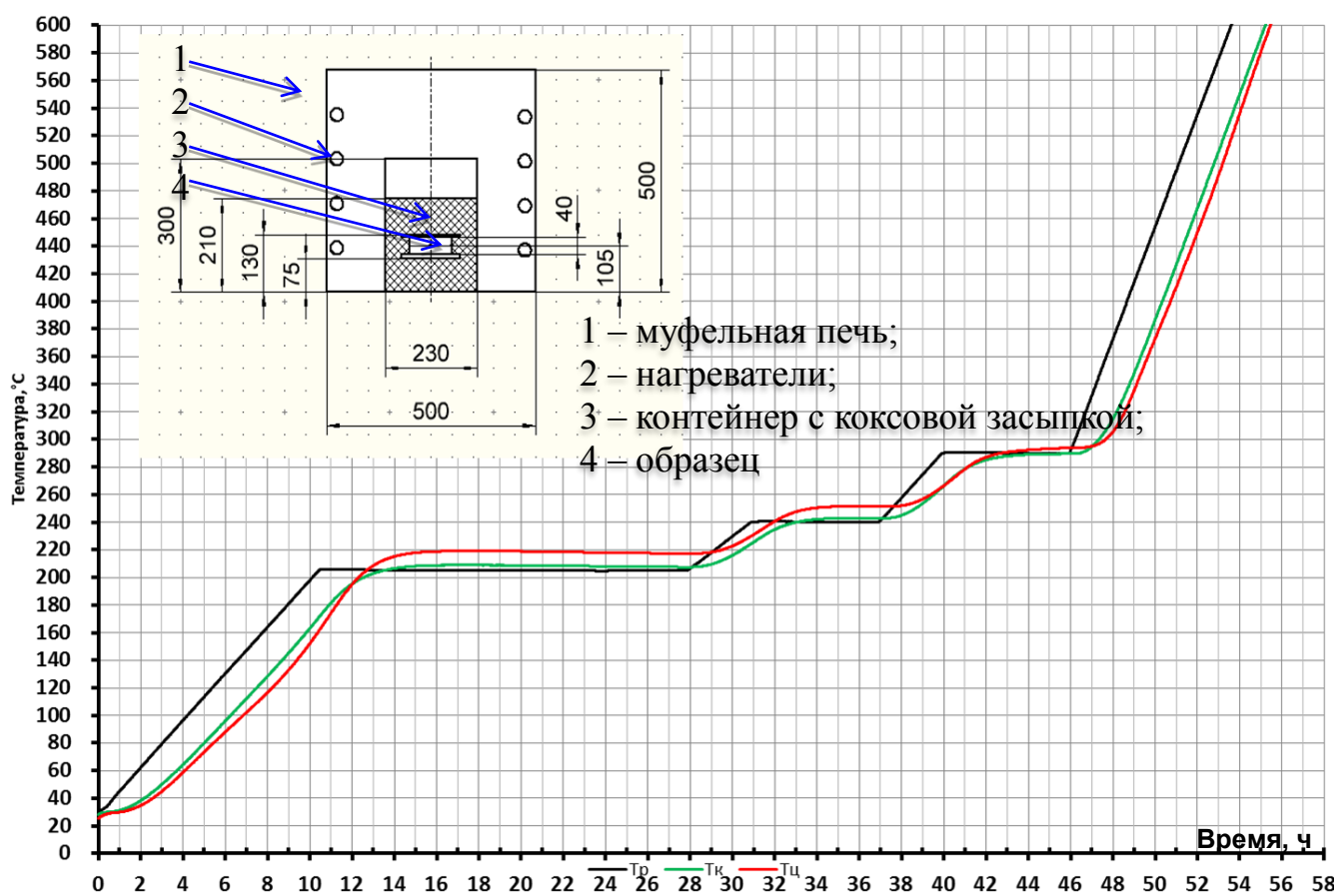


Рисунок 1 – Графики зависимости температуры в реакторе T_p , на крае T_k и в центре T_c образца в процессе термостабилизации

Установлено, что выделение тепла начинается уже при (150-160) °С, в отличие от литературных данных, полученных на ПАН-жгутах, где его влияние начинается при температурах (190-205) °С и наиболее интенсивно происходит в интервале (180-290) °С (температура в центре образца сначала сравнивается, а затем превышает температуру на крае образца). Это подтверждает результаты анализа концентрации ПМЦ методом ЭПР (см. табл. 2) о низкой степени окисления исходного «ОКСИПАНа». Результаты эксперимента позволили минимизировать негативное влияние экзотермического эффекта путем корректировки температурно-временного режима термостабилизации и карбонизации полимерной прессованной заготовки и получить бездефектные каркасы и УУКМ на их основе. Полученные углеродные каркасы получили название Ипресскон® (свидетельство на товарный знак № 637135). Получен патент РФ № 2620810 на способ изготовления пористого каркаса-основы композиционного материала.

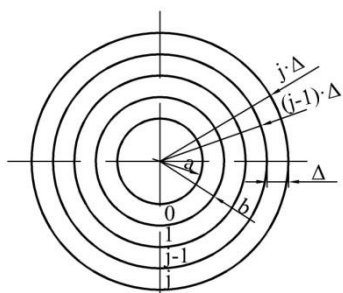
Исследованы прочностные свойства отдельных углеродных волокон, полученных на основе элементарных волокон исходного ПАНа, карбонизованных по разработанному режиму. Установлено, что величина предела прочности элементарной углеродной нити в Ипресконе® (температура карбонизации 1000 °С, плотность 1,64 г/см³) составляет от 1,44 до 1,99 ГПа при относительном удлинении (1,25-1,55) %. Результаты измерения

открытой пористости в Ипресконе[®] методом эталонной порометрии показали значения (62-68)%, приведенный диаметр пор – от 10 мкм до 60 мкм. Плотность плоских углеродных каркасов после карбонизации – (0,53-0,63) г/см³, линейная усадка – (8-16)%.

Четвертая глава посвящена решению отдельной задачи при создании нового класса УУКМ на нетканой основе, имеющей непосредственную практическую значимость для осесимметричных деталей изделий ракетно-космической техники (РКТ)– получению цилиндрических (тубулярных) иглопробивных каркасов и УУКМ на их основе. Рассмотрены два технологических варианта решения этой задачи: гидроструйное уплотнение прочесанного холста «ОКСИПАНа» с дальнейшей намоткой на вал и уплотнением заготовки прессованием вдоль оси цилиндра, а также механическое иглопробивание и намотка холста на вал с армированием (иглопробиванием) вдоль радиуса намотки и последующим прессованием вдоль оси цилиндра. После прессования заготовки каркасов в обоих случаях подвергались неокислительному отжигу (карбонизации).

Формирование макетных образцов внешним диаметром $\varnothing 55$ мм по первому варианту (гидроструйному) дало положительный результат, на их основе получены УУКМ с двумя типами матриц – на основе кокса каменноугольного пека и на основе пиролитического углерода. Однако использование данной технологии на массивных заготовках диаметром $\varnothing 190$ мм выявило существенные проблемы при снятии заготовки с оснастки, а в последующем привело к серьезным дефектам или катастрофическим разрушениям каркаса после перевода в углеродное состояние.

Для оценки напряжений, возникающих при формировании массивных цилиндрических объектов, решена задача математического моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) полимерного холста при его намотке на цилиндрическую металлическую оправку. Использован метод решения, применяемый в механике фронтально растущего тела, где слои представлены в виде последовательно наращиваемых тонких колец с предварительным окружным напряжением натяжения σ_{φ}^* (рисунок 2).



a и b – внутренний и наружный радиусы оправки соответственно, мм;

j – номер слоя материала холста;

Δ – толщина слоя

Рисунок 2 – Схематичное представление наматываемого цилиндра в виде набора колец

Алгоритм рассмотрения следующий. Пусть намотан $(j-1)$ слой толщиной Δ каждый. Далее на анизотропный материал, находящийся на изотропной упругой оправке, наматывается слой j толщиной Δ с заданным натяжением. Этот слой будет создавать в массиве предыдущих слоев напряжения сжатия. На него не

оказывает влияния НДС предыдущей конструкции. Затем интегрированием всех предыдущих и последующих воздействий получается окончательное распределение напряжений. Из уравнений равновесия, соотношений Коши, и закона Гука получили определяющее дифференциальное уравнение для радиальных напряжений σ_r , используемое для ортотропного материала, следующего вида:

$$\frac{d^2\sigma_r}{dr^2} + \frac{3}{r} \frac{d\sigma_r}{dr} + (1-k^2)\sigma_r = 0 \quad (1)$$

где r – текущий радиус в холсте, намотанном на оправку, мм;

k – коэффициент упругой анизотропии материала

$$k = \sqrt{\frac{E_\varphi}{E_r}} \quad (2)$$

На границах соблюдаются условия непрерывности векторов напряжений и перемещений. Материал оправки изотропен, и для него $k=1$.

В результате решения полной системы уравнений с соблюдением граничных условий получены следующие выражения для радиальных и окружных напряжений $\sigma_r(r, R(t))$ и $\sigma_\varphi(r, R(t))$ в растущем теле с учетом изотропной оправки:

$$\sigma_r(r, R(t)) = - \left[r^{k-1} + \frac{B}{r^{k+1}} \right] \cdot \int_r^{R(t)} \frac{\sigma_\varphi^* d\xi}{\xi^{k+B} \cdot \xi^{-k}}; \quad (3)$$

$$\sigma_\varphi(r, R(t)) = -k \left(r^{k-1} - \frac{B}{r^{k+1}} \right) \cdot \int_r^{R(t)} \frac{\sigma_\varphi^* d\xi}{\xi^{k+B} \cdot \xi^{-k}} + \sigma_\varphi^*; \quad (4)$$

$$B = \frac{A}{C}; \quad A = b^{2 \cdot (k-1)} [(b^2 - a^2) - b^2 \cdot C] \quad (5)$$

$$C = \frac{E_\varphi}{2k} \cdot \left[\frac{1-\nu_0}{E_0} + \frac{1+\nu_0}{E_0} \cdot \frac{a^2}{b^2} + \frac{k+\nu_{r\varphi}}{E_\varphi} \cdot \left(1 - \frac{a^2}{b^2} \right) \right] \quad (6)$$

где r – текущий радиус в холсте, намотанном на оправку, мм;

a и b – внутренний и наружный радиусы оправки соответственно, мм;

$\xi = b + (j-1) \cdot \Delta$ – переменный радиус при намотке, мм;

E_0 , E_φ , E_r – модули Юнга оправки и материала в окружном и радиальном направлениях соответственно, МПа;

ν_0 , $\nu_{r\varphi}$ – коэффициенты Пуассона оправки и материала соответственно;

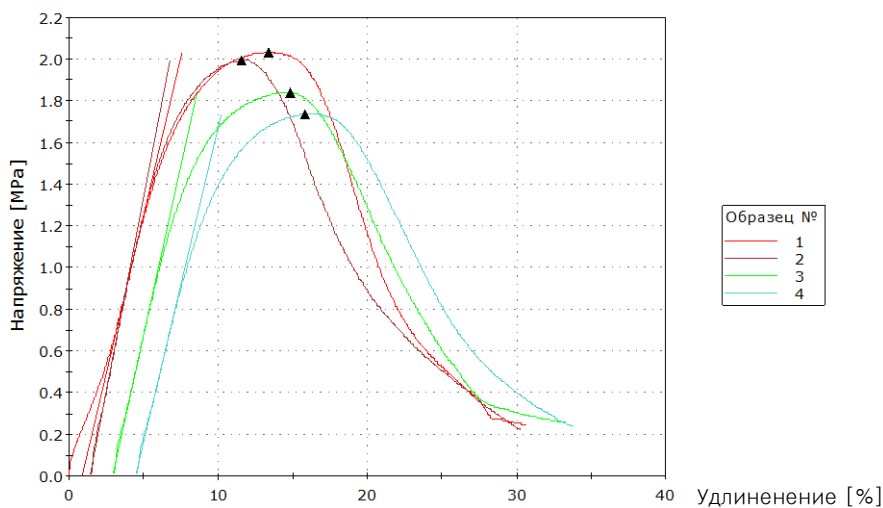
k – коэффициент упругой анизотропии материала;

$R(t)$ – переменный (наращиваемый) наружный радиус наматываемого холста, мм;

t – время намотки, с;

σ_φ^* – задаваемое напряжение натяжения на витке при намотке, МПа.

Полученное решение в виде аналитических формул замкнутого вида позволяет получить значения для радиальных и окружных напряжений, действующих при намотке на оправку. Модули Юнга и коэффициенты Пуассона материала в окружных и радиальных направлениях получены экспериментально: окружные значения – из результатов испытаний на растяжение монохолстов по диаграммам напряжений (рисунок 3), а сжимающие – при помощи оптического измерения поперечных перемещений пакета холстов при приложении сжимающих напряжений.



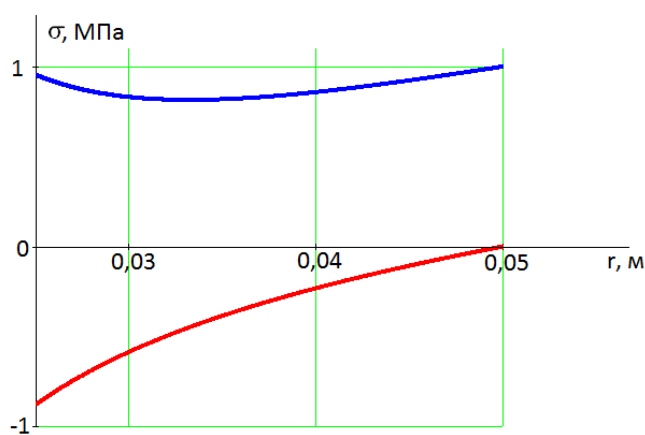
Скорость испытания	10,0 мм/мин
Температура	22,0 °С
Ширина образца	9,5 мм
Длина	50,0 мм

Рисунок 3 – Получение диаграмм напряжений в результате испытаний на растяжение и определение модуля Юнга в окружном направлении

На основании результатов механических испытаний на растяжение построены диаграммы напряжений, оценены значения модулей Юнга и коэффициентов Пуассона. Показано, что радиальное армирование массивных цилиндрических объектов путем иглопробивания изменяет анизотропию материала, уменьшая радиальные и окружные напряжения и снижая коэффициент Пуассона каркаса примерно в 5 раз (рисунок 4), и, как следствие, – сохраняет устойчивость слоев при прессовании цилиндрических заготовок из «ОКСИПАНа». Малая величина коэффициента Пуассона приводит к уменьшению давления спрессованного материала на стенки закрытой пресс-формы, упрощая ее конструкцию и операцию распрессовки.

1. Без прошивки

$\sigma_{\varphi}^* = 1 \text{ МПа}$; $E_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; $\nu_0 = 0,33$; $E_{\varphi} = 40,4 \text{ МПа}$;
 $E_r = 30 \text{ МПа}$; $a = 23 \text{ мм}$; $b = 25 \text{ мм}$; $R(t) = 50 \text{ мм} = \text{const}$;
 $\nu = 0,05$



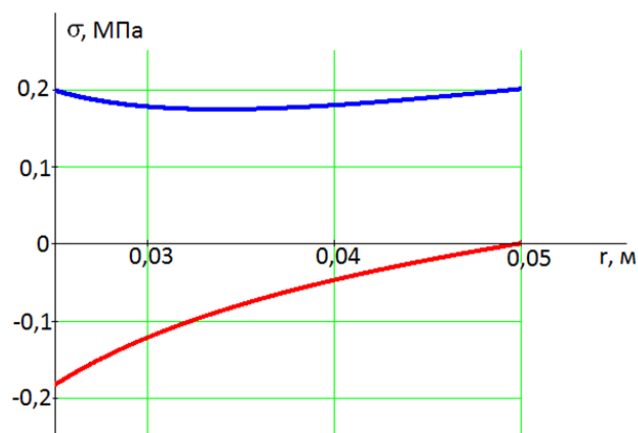
σ_r — радиальные напряжения
 σ_{φ} — окружные напряжения

$b \geq r \geq R(t)$

а

2. С радиальным иглопробиванием

$\sigma_{\varphi}^* = 0,2 \text{ МПа}$; $E_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; $\nu_0 = 0,33$; $E_{\varphi} = 1,5 \text{ МПа}$;
 $E_r = 10 \text{ МПа}$; $a = 23 \text{ мм}$; $b = 25 \text{ мм}$; $R(t) = 50 \text{ мм} = \text{const}$;
 $\nu = 0,01$



σ_r — радиальные напряжения
 σ_{φ} — окружные напряжения

$b \geq r \geq R(t)$

б

Рисунок 4 – Диаграммы радиальных и окружных напряжений в случае намотки без радиальной прошивки (а) и при радиальном иглопробивании (б)

В результате применения радиального армирования путем иглопробивания получены массивные цилиндрические каркасы диаметром 190 мм, высотой до 150 мм, плотностью (0,70-0,75) г/см³, микроструктура которых демонстрирует характерную анизотропию (рисунок 5).

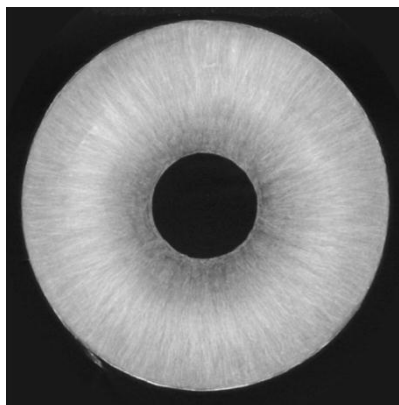


Рисунок 5 – Томографическое изображение микроструктуры поперечного среза. Видна характерная анизотропия из-за радиального иглопробивного армирования

Отчетливо различимое радиальное армирование обеспечивает дополнительное усиление прочности заготовки в радиальном направлении, что актуально для наиболее теплонагруженных элементов пресс-форм горячего прессования – цилиндрических обечаек. Полученные в дальнейшем УУКМ на основе радиально армированных цилиндрических каркасов продемонстрировали отсутствие в их структуре макродефектов (трещин, расслоений).

В пятой главе представлены результаты получения высокоплотных УУКМ на основе Ипресскона® с двумя типами матриц: из кокса каменноугольного пека и

пиролитического углерода, а также результаты их испытаний на теплоэрозионную стойкость и определения физико-механических и теплофизических характеристик.

В процессе уплотнения Ипрессконов[®] матрицей кокса пека на промышленной установке пекопропитки проанализирована кинетика увеличения плотности по стадиям пекопропиток. Достижение состояния высокоплотного УУКМ с плотностью свыше $1,90 \text{ г/см}^3$ для Ипресскона[®] происходит за меньшее количество циклов пропитки/карбонизации (6 циклов), чем у стержневого каркаса материала МКУ4М-7 (8-9 циклов), что иллюстрирует график рисунка 6.

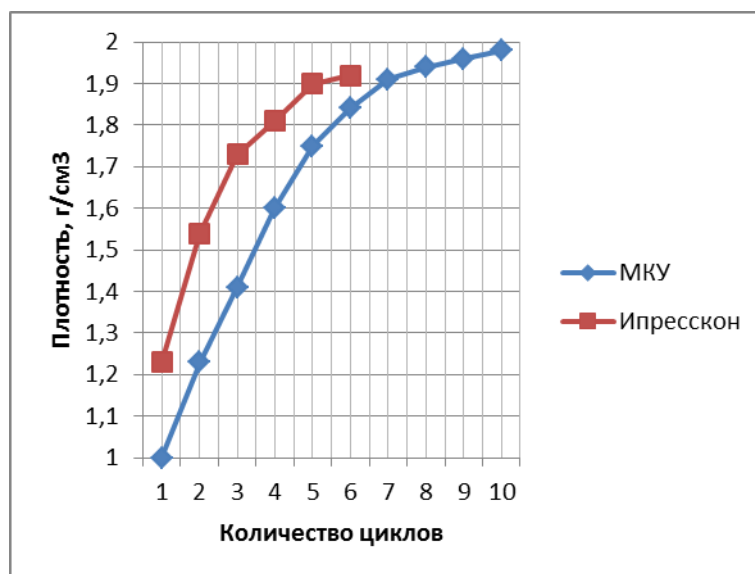
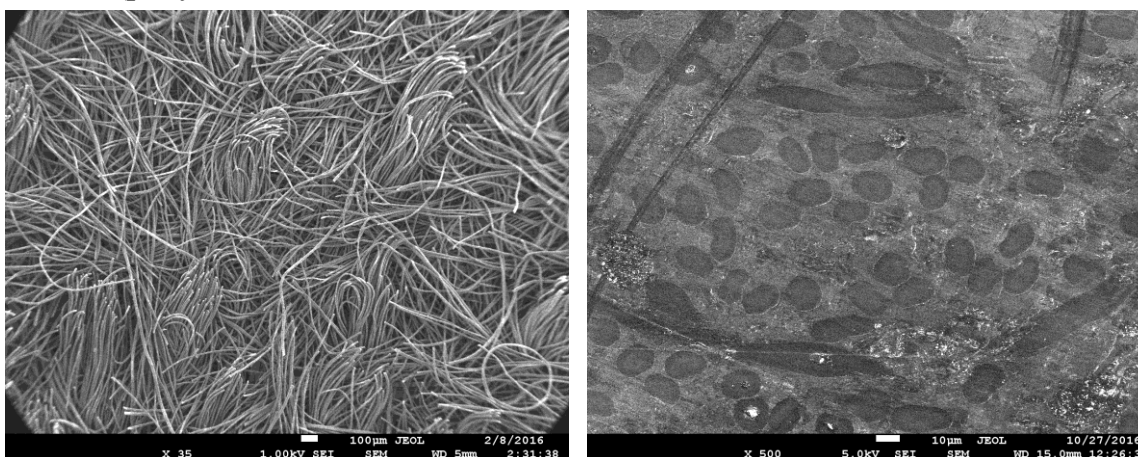


Рисунок 6 – Сравнение скорости уплотнения пековой матрицей УУКМ МКУ4М-7 и УУКМ-Ипресскон[®]

Это связано с малым размером структурной ячейки Ипресскона[®], определяемым величиной поры (приведенный диаметр поры – 10-60 мкм в сравнении с размером ячейки 0,7 мм у МКУ4М-7), позволяющей удерживать расплавленный пек лапласовскими силами смачивания, что подтверждает анализ микроструктуры Ипресскона[®] и УУКМ на его основе (рисунок 7).



а

б

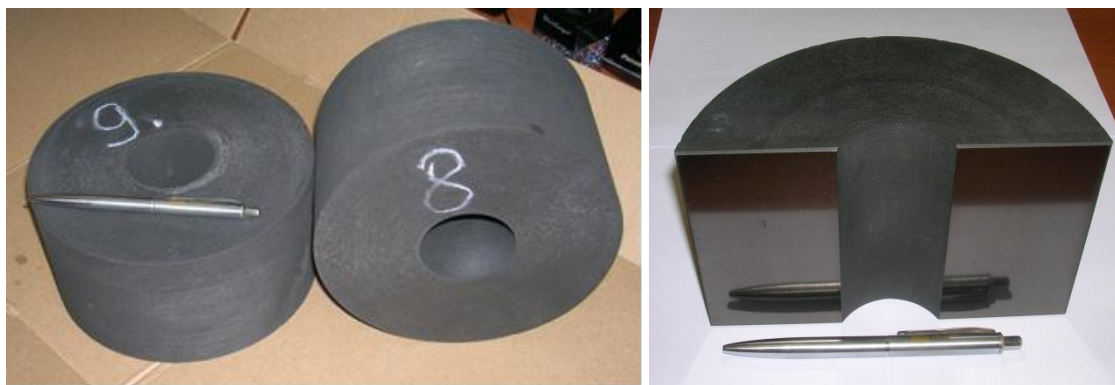
Рисунок 7 - Результаты исследования микроструктуры Ипресскона (а) ; микроструктура шлифа УУКМ с пековой матрицей плотностью $1,88 \text{ г/см}^3$ ($\times 500$) (б)

Результаты измерения открытой пористости методом эталонной контактной порометрии показали для УУКМ плотностью около $1,9 \text{ г/см}^3$ основное распределение пор в диапазоне размеров приведенного диаметра от 10 мкм до 60 мкм. Малый размер структурной ячейки в совокупности с высокой кинетикой уплотнения при жидкофазном методе делают полученный каркас привлекательным с точки зрения дальнейшей разработки керамо- и металломатричных КМ. В результате жидкофазного уплотнения углеродного каркаса в виде блока с длиной одной из сторон 700 мм получены образцы высокоплотных УУКМ с плотностью $(1,90 \pm 0,02) \text{ г/см}^3$. На основании преформы плотностью $1,55 \text{ г/см}^3$ получен углерод-керамический КМ состава C-SiC, из которого изготовлен теплозащитный экран со сложной перфорацией для теплонагруженного узла изделия РКТ (рисунок 8).



Рисунок 8 - Теплозащитный экран из УУКМ C-SiC на основе углеродной преформы из Ипресскона®

Уплотнение пироуглеродной матрицей массивных образцов типа втулки диаметром $\text{Ø}175 \text{ мм}$ из газовой фазы метана позволило достичь плотности УУКМ ($1,74\text{-}1,76 \text{ г/см}^3$) после мехобработки. Измельченная структурная ячейка позволила обеспечить шероховатость поверхности R_a после полировки – от 0,6 до 0,8 (рисунок 9), что сопоставимо с чистотой поверхности полированного металла. Высокие значения шероховатости поверхности позволяют использовать разработанный УУКМ в тонких или сложнопрофилированных изделиях, таких как электроды ионно-оптических систем, надроторные вставки, остроконечные кромки летательных аппаратов, теплозащитные сложно перфорированные экраны теплонагруженных узлов и др.



а

б

Рисунок 9 – Газофазно уплотненные УУКМ диаметром $\text{Ø}175 \text{ мм}$ после мехобработки (а) и после полировки (б)

Измельченная структурная ячейка в высокоплотном УУКМ позволяет также добиться высокой теплоэрозионной стойкости при интенсивном термохимическом нагружении, что подтверждено стендовыми испытаниями на базе оборудования ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». Так, образцы УУКМ-Ипресскон® с матрицами из пиролитического углерода и кокса каменноугольного пека в виде макетных вкладышей критического сечения сопла (ВКС) испытаны на плазмотроне в воздушно-спиртовой смеси. Сравнительные результаты их огневых испытаний и современного серийного УУКМ марки МКУ4-М7 приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Сравнительные результаты тепловых испытаний на плазмотроне макетных образцов ВКС из УУКМ-Ипресскон® (пироуглерод, кокс пека) и МКУ4-М7

Материал образца, матрица	Плотность, г/см ³	Скорость линейного уноса, мм/с	Удельный массовый унос, кг/м ² ·с
Ипресскон®, пироуглерод	1,75	0,092	0,182
Ипресскон®, кокс пека	1,92	0,16-0,23	0,30
МКУ4-М7, кокс пека	1,93	0,13-0,22	0,26

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что теплоэрозионная стойкость УУКМ-Ипресскон® находится на уровне или немного превышает аналогичные показатели УУКМ марки МКУ4-М7.

УУКМ-Ипресскон® с матрицей из кокса пека в виде макета газодинамического руля с плотностью (1,90±0,01) г/см³ испытан на установке на базе твердотопливного газогенератора. Эталонным материалом являлся УУКМ марки КИМФ, образцом сравнения служил современный УУКМ ИПП на основе иглопробивного ленточного каркаса с пековой матрицей. Сравнительные скорости уноса массы и площади образцов представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Сравнительные скорости уноса массы и площади макетных образцов газодинамического руля различных УУКМ

№ ОИ	Материал образца	Скорость уноса массы, г/с	Скорость уноса площади, мм ² /с
1	КИМФ	2,6	146,5
2	КИМФ	2,7	153,4
3	ИПП	2,9	138,9
4	Ипресскон®-пек	2,2	110,0

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что теплоэрозионная стойкость УУКМ-Ипрескон® превышает показатели образцов сравнения, в том числе на (15-35)% показатели серийно выпускаемого эталонного УУКМ марки КИМФ.

В таблице 5 сопоставлены физико-механические (ФМХ) и теплофизические характеристики (ТФХ) полученных УУКМ-Ипрескон® со свойствами серийно выпускаемых графитов и УУКМ.

Таблица 5 - Результаты определения ФМХ, ТФХ полученных УУКМ и сопоставление с серийно выпускаемыми материалами

Свойства материала	Графиты МПГ-6, МПГ-7 или аналоги	КИМФ	МКУ4М-7	УУКМ-Ипрескон (пироуглерод), втулка	УУКМ-Ипрескон (кокс пека), пластина
Плотность, г/см ³	1,7-1,8	1,7	1,97	1,75-1,80	(1,90±0,05)
Коэфф-т Дарси при перепаде давления (5,5-4,5)·10 ⁵ Па, м ²	-	(10 ⁻¹⁴ -10 ⁻¹³)	-	-	8,5·10⁻¹⁹
Предел прочности при растяжении, МПа (X-Y)	30-33	49-74	67-103	(образцы вырезаны в направлении) 140-160 по напр.R; 15-20 по Z	не менее 70
Предел прочности при сжатии, МПа (Z)	80-110	180-215	96-135	180-240 по R 330-390 по Z	180-230
Теплопроводность при 50 °С в направлении оси X, Вт/(м·К)	90-110	8,6	65-70	16 по R	63-72
Теплопроводность при 50 °С в направлении оси Z, Вт/(м·К)	90-110	5,4	50-53	8 по Z	23-30
ТКЛР ×10 ⁻⁶ , К ⁻¹ в интервале от 50 до 1500°С	2,5-5,0	1,0-2,7	0-2,5	0-1,1 от 50° до 400°С	(-0,5-2,0) от 20° до 1900°С

Установлено, что значения ключевых физико-механических характеристик УУКМ-Ипрескон® в (2-5) раз превосходят соответствующие показатели высокоплотных графитов и соответствуют или превышают свойства ряда серийно выпускаемых УУКМ. Имеющуюся анизотропию свойств в радиальном и осевом направлении у цилиндрических образцов УУКМ с пироуглеродной матрицей следует учитывать на стадии проектирования конструкций и деталей из УУКМ на основе Ипрескона®. Теплофизические свойства УУКМ-Ипрескон® сравнимы со свойствами серийно выпускаемых УУКМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основании полученных результатов исследований разработана базовая технологическая схема изготовления углерод-углеродного композиционного материала на основе нетканого окисленного полиакрилонитрила, сочетающего в себе прочностные свойства традиционных УУКМ с однородной измельченной структурой графитов.

Установлена необходимость применения иглопробивной технологии в сочетании с прессованием на стадии формирования полимерных заготовок, разработаны режимы термообработок для получения армирующего углеродного каркаса. В результате разработанной технологической схемы показана реальная альтернатива полученных композитов на нетканой основе традиционным КМ на нитяной основе, для которых используется более дорогостоящее сырье, а технологический цикл – более сложный и длительный.

2. Установлен интервал значений объемной плотности прессования полимерных заготовок каркасов (от 0,70 до 0,90 г/см³), при котором достигается конструкционная прочность каркаса без макроструктурных дефектов – трещин, расслоений. Определены закономерности прессования применительно к различным направлениям приложения усилия относительно укладки иглопробитых холстов.

3. Выявлены уровни экзотермического эффекта на различных стадиях перевода консолидированных (спрессованных) ПАН-волокон в углеродный каркас, определены величины усадок и возможность преодоления негативного влияния экзотермического эффекта путем применения специальных оснасток и корректировки режимов термообработок в сторону более плавного подъема температуры. Количественная оценка свойств углеродного волокна ($\rho=1,64$ г/см³, σ_b - до 2 ГПа) после его перевода из окисленного ПАНа в углеродное состояние по установленным режимам указывает на значительный уровень прочности волокон.

4. Построена математическая модель напряженно-деформированного состояния при намотке холста на цилиндрическую металлическую оправку (аналитическая модель механики растущего тела), с помощью которой установлено, что радиальное иглопробивание приводит к уменьшению радиальных и окружных напряжений и позволяет добиться устойчивости слоев при намотке и прессовании цилиндрических заготовок из окисленного ПАНа. Это приводит к уменьшению давления на стенки стальной пресс-формы, что упрощает ее конструкцию и операцию распрессовки.

5. Установлено, что использование углеродных каркасов на основе окисленного ПАНа позволяет достичь плотности конструкционного УУКМ за меньшее число циклов при жидкофазном уплотнении, чем серийно выпускаемые УУКМ (достижение плотности УУКМ 1,90 г/см³ происходит за 6 циклов пекопитки и карбонизации против 8-9 циклов у стержневого каркаса). Показано, что разработанные УУКМ с однородной мелкоячеистой пористой структурой (размер приведенного диаметра пор (10-60) мкм) по сравнению с порами до нескольких миллиметров у существующих УУКМ являются перспективными в качестве преформ для дальнейшей разработки керамо- и металломатричных КМ.

6. Получены конструкционные УУКМ на основе углеродного каркаса марки Ипресскон[®] с двумя типами матриц (кокс каменноугольного пека и пиролитический

углерод); изготовлены крупногабаритные заготовки изделий различной конфигурации (втулка, прямоугольный блок). Высокие значения газоплотности (коэффициент Дарси не более $(8,5 \cdot 10^{-19}) \text{ м}^2$ при перепаде давления $(5,5-4,5) \cdot 10^5 \text{ Па}$ и шероховатости поверхности (R_a – от 0,6 до 0,8) позволяют использовать разработанный УУКМ в тонких (1-1,5) мм или сложно профилированных изделиях (электроды ионно-оптических систем, остроконечные кромки летательных аппаратов, теплозащитные перфорированные экраны теплонагруженных узлов).

7. Для полученных УУКМ экспериментально определены значения физико-механических и теплофизических характеристик (предел прочности при растяжении – свыше 70 МПа (у графитов – (30-33) МПа), предел прочности при сжатии – не менее 140 МПа (у графитов – (80-110) МПа), теплопроводность при 50 °С в направлении оси X – (63-72) Вт/(м·К), теплопроводность при 50 °С в направлении оси Z (23-30) Вт/(м·К), КЛТР в интервале от 50 до 1900°С $(-0,5-2,0) \times 10^{-6}, \text{ К}^{-1}$). Установлено, что их уровень соответствует или превышает уровень свойств серийно выпускаемых УУКМ. Полученные УУКМ показали высокую термоокислительную стойкость при интенсивном термохимическом нагружении в воздушно-спиртовом потоке и на твердотопливном стенде.

8. В результате применения разработанной технологической схемы изготовлены конструкционные УУКМ, из которых получены: цилиндрическая силовая обечайка диаметром Ø160 мм пресс-формы горячего прессования; ускоряющий электрод ионно-оптической системы высокочастотного ионного двигателя; теплозащитный перфорированный экран теплонагруженного узла. По указанным изделиям имеются акты внедрения. Получен патент РФ № 2620810 «Способ изготовления пористого углеродного каркаса – основы композиционного материала». Получено свидетельство № 637135 на товарный знак каркаса на нетканой основе марки Ипресскон®.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Сравнение двух технологических подходов при формировании цилиндрических заготовок из штапельного окисленного полиакрилонитрила для углерод-углеродных композитов / Елаков А.Б., Богачев Е.А., Турусов Р.А. // Сборник трудов XVII ежегодной научной конференции отдела полимеров и композиционных материалов «Полимеры-2016». ФГБУН ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН: Москва, 2016. – С. 12.
2. Интенсивность адгезионного взаимодействия и монолитность волокнистых композитов / Турусов Р.А., Богачев Е.А., Елаков А.Б. // Сборник трудов XVII ежегодной научной конференции отдела полимеров и композиционных материалов «Полимеры-2016». ФГБУН ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН: Москва, 2016. – С. 40.
3. Особенности формирования цилиндрических заготовок из штапельного окисленного полиакрилонитрила методами иглопробивных технологий для углерод-углеродных композитов / Елаков А.Б., Богачев Е.А., Турусов Р.А. // Сборник материалов VI Международной конференции с элементами научной

школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества»: Суздаль, 2016. – С. 96.

4. Турусов Р.А., Богачев Е.А., Елаков А.Б. Роль интенсивности адгезионного взаимодействия и жесткости матрицы в передаче усилий от цельного волокна к разорванному в волокнистом композите и в реализации прочности армирующих волокон. Часть I // **Механика композиционных материалов и конструкций (МКМК).** – 2016 – том 22, №3. – С. 430-451.
5. Турусов Р.А., Богачев Е.А., Елаков А.Б. Роль интенсивности адгезионного взаимодействия и жесткости матрицы в передаче усилий от цельного волокна к разорванному в волокнистом композите и в реализации прочности армирующих волокон. Часть II // **Механика композиционных материалов и конструкций (МКМК).** – 2016. Том 22. №4. – С. 536-547.
6. Патент. Российская Федерация. Способ изготовления пористого каркаса-основы композиционного материала / Богачев Е.А., Елаков А.Б., Белоглазов А.П., Денисов Ю.А., Тимофеев А.Н. – Рег. № 2620810 от 29.05.2017 г.
7. Моделирование течения газа при термообработке в объемном волокнистом пористом каркасе для углерод-углеродных композитов / Турусов Р.А., Богачев Е.А., Сергеев А.Ю., Елаков А.Б. // Сборник трудов XVIII ежегодной научной конференции отдела полимеров и композиционных материалов «Полимеры-2017». ФГБУН ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН: Москва, 2017. – С. 52.
8. Богачев Е.А., Турусов Р.А., Сергеев А.Ю., Елаков А.Б. Особенности получения каркасов органоморфных углерод-углеродных композитов. // Сборник трудов 7-ой Всероссийской конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского: Москва, 2017 г. – С. 37-40.
9. Елаков А.Б., Турусов Р.А., Богачев Е.А., Сергеев А.Ю. Моделирование напряженно-деформированного состояния нетканого холста при намотке на цилиндрическую оправку. // **Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки.** 2018. Т.24. №2. – С. 149-160.
10. Ускоряющий электрод ионного двигателя из углерод-углеродного композиционного материала / Р.В. Ахметжанов, В.В. Балашов, Е.А. Богачев, А.Б. Елаков // Сборник трудов XLII Академических чтений по космонавтике «Королевские чтения»: Москва. 2018 – С. 67.
11. Ахметжанов Р.В., Балашов В.В., Богачев Е.А., Елаков А.Б., Каширин Д.А., Свотина В.В., Спивак О.О., Черкасова М.В. Ускоряющий электрод ионного двигателя из углерод-углеродного композиционного материала // **Известия Академии наук. Энергетика.** Москва. 2018. №3. – С. 22-32.