

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»**

На правах рукописи



ЛУЧКИН МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ

**Углерод-углеродный композиционный материал на базе пековых матриц с
повышенными физико-механическими характеристиками**

2.6.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева»

Научный руководитель доктор химических наук, профессор
Бухаркина Татьяна Владимировна

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор
Николаев Александр Игоревич

профессор кафедры нефтехимического синтеза и синтетического жидкого топлива им. А.Н. Башкирова Московского института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова

Кандидат химических наук, доцент
Максимова Наталья Владимировна

доцент кафедры Химической технологии и новых материалов Химического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита состоится: 21 января 2025 в 11:00 часов на заседании диссертационного совета РХТУ.2.6.02 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, г. Москва, Миусская пл., 9) в конференц-зале в аудитории 443.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://muctr.ru>

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь диссертационного совета РХТУ.2.6.02

д.х.н., профессор



Козловский Р.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Высокие темпы современного развития науки и техники неизбежно влекут за собой необходимость создания многофункциональных материалов с высоким уровнем свойств и эксплуатационных характеристик.

Одними из самых перспективных материалов, которые применяются практически во всех отраслях промышленности и различных областях техники, являются углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ). Применение УУКМ является экономически выгодным, поскольку изделия из данных материалов обладают высокими эксплуатационными характеристиками в широких диапазонах температур при относительно низкой плотности (1,7-2,1 г/см³). Существует возможность получать УУКМ с различными свойствами путем изменения технологических операций производства и их последовательности, а также использования различных видов сырья. Опыт производства и применения УУКМ показывает, что использование пеков в качестве матрицы позволяет вариативно изменять и управлять свойствами композита.

В этом ключе перспективным представляется изучение динамики изменения свойств и структуры УУКМ на пековых матрицах после прохождения технологических переделов производства. На основе полученных результатов необходимо сделать вывод о возможности обеспечения более высоких и стабильных физико-механических и теплофизических характеристик, чем в традиционно применяемых технологических режимах, и получить новый материал, обладающий свойствами, необходимыми для применения в авиационных тормозах новых конструкций.

Степень разработанности темы: основы современных представлений о технологии производства УУКМ на пековых матрицах были заложены в 1960-х г. Е.Ф. Чалых в своих работах выделил основные технологические этапы и оборудование, применяемые для производства материалов данного класса. А.С. Фиалков описал процессы производства УУКМ с точки зрения изменения структуры и химизма процессов. На базе АО «НИИГрафит» и ФГУП «ВИАМ»

производились разработка и внедрение новых УУКМ на основе пековых матриц для различных целей. В мировой практике лидирующие позиции в производстве новых УУКМ занимают США и Китай, активные исследования в данной области проводят специалисты из Индии. Комбинируя различные технологии производства и сырьевые материалы, различным фирмам из данных стран удалось получить широкий спектр УУКМ, различающихся своими свойствами и назначением.

Цель работы: получение УУКМ на базе пековых матриц и каркаса из углеродного волокна, характеризующегося более высокими и стабильными физико-механическими и теплофизическими характеристиками, чем материал, полученный по традиционной технологии.

Задачи работы:

- 1) выделить основные технологические переделы производства УУКМ, оказывающие наибольшее влияние на их структуру и свойства;
- 2) провести оценку и предложить наиболее подходящие методы неразрушающего контроля для УУКМ на базе пековых матриц и армирующего каркаса из углеродного волокна;
- 3) установить технологические режимы процессов производства УУКМ на базе пековых матриц и армирующего каркаса из углеродного волокна, обеспечивающие их высокие и стабильные физико-механические и теплофизические характеристики;
- 4) оценить степень воздействия на структуру и свойства рассматриваемого материала дополнительных циклов уплотнения пиролитическим углеродом.

Научная новизна:

- 1) установлено, что для рассматриваемого материала на базе каркаса из углеродного волокна и пековой матрицы основной вклад в формирование структуры определяется не взаимодействием кристаллитов волокна и мезофазы матрицы, а режимами технологических процессов: пропитка и карбонизация под давлением и последующая высокотемпературная обработка;

2) для рассматриваемого УУКМ на основе волокнистого каркаса и пековой матрицы выявлено и обосновано влияние вклада свойств границы раздела волокно-матрица на прочностные характеристики;

3) получена кинетическая модель скорости осаждения пироуглеродного слоя на поверхности углеродного волокна, адекватно описывающая изменение массы и толщины слоя в широком интервале варьирования продолжительности осаждения.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в следующем:

1) Разработан и запатентован режим пропитки и карбонизации под давлением, позволяющий получать матрицу материала с меньшим количеством микродефектов;

2) Обоснован выбор финишной температуры высокотемпературной обработки УУКМ на базе каркаса из углеродного волокна и пековой матрицы, позволяющий получать заготовки с повышенными прочностными характеристиками;

3) Предложена методика сквозного неразрушающего контроля изделия по косвенному определению прочностных характеристик материала посредством измерения его твердости;

4) Предложена методика контроля степени совершенствования структуры рассматриваемого УУКМ методом рамановской спектроскопии;

5) Расширена база сведений о связи свойств материала с технологическими условиями производства УУКМ, что дает возможность предсказывать структуру и физико-химические свойства материала.

Методология и методы исследования. Основными методами исследований в диссертационной работе являлись определение пределов прочности на сжатие и изгиб образцов УУКМ, теплофизические испытания, измерение твердости по методу Роквелла, сканирующая электронная микроскопия, рентгенодифрактометрический анализ, спектроскопия комбинационного рассеяния.

Положения, выносимые на защиту:

1. методика выбора температуры финишной высокотемпературной обработки для обеспечения более высоких и стабильных физико-механических характеристик;

2. применение рамановской спектроскопии, как метода фиксации отклонений в технологическом режиме производства УУКМ, в частности определение температуры финишной термообработки по структурным изменениям в материале;

3. режим пропитки и карбонизации под давлением заготовок УУКМ на базе каркаса из углеродного волокна и пековой матрицы;

4. кинетическая модель осаждения пироуглерода на поверхности углеродного волокна.

Достоверность результатов обеспечивается применением стандартных методов испытаний, апробированных методик исследования, а также современных методов анализа и обработки полученных результатов.

Апробация работы. Основные результаты работы представлены и обсуждены на XIX Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов "Актуальные проблемы недропользования" (г. Санкт-Петербург, Россия, апрель 2021 г.), LIX Международной научно-практической конференции «EurasiaScience» (г. Москва, Россия, февраль 2024 г.), Международной научно-практической конференции «Молодежный форум: Актуальные вопросы современной науки» (г. Пенза, Россия, февраль 2024 г.), VI международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки и образования» (г. Москва, Россия, март 2024 г.), XIII Международной научно-практической конференции «Студенческий научный форум 2024» (г. Пенза, Россия, июль 2024 г.), XX Международном конгрессе по химии и химической технологии (г. Москва, Россия, 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах. Результаты научного исследования подтверждены участием на научных мероприятиях

всероссийского и международного уровня: опубликовано 6 работ в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов. Получен 1 патент РФ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка использованной литературы. Работа изложена на 103 страницах, содержит 43 рисунка, 6 таблиц, библиографию из 91 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость.

В первой главе представлен обзор литературы по теме диссертации. Приведены основные операции получения УУКМ, а также физико-механические и теплофизические характеристики, применяемые для описания свойств данных материалов. Описаны основные области применения УУКМ. Также приведены литературные данные о влиянии режимов пропитки и карбонизации под давлением, высокотемпературной термообработки на финишные свойства и структуру УУКМ. Рассмотрены методы неразрушающего контроля, применяемые для УУКМ и изделий из них.

Во второй главе приведены основные объекты и методы исследований.

В качестве объекта исследования был выбран дискретно и хаотично армированный графитированными волокнами УУКМ на базе пековых матриц.

Для определения характеристик рассматриваемого материала применялись следующие методы исследований:

1) определение плотности — согласно ГОСТ 2409-95 «Огнеупоры и пористости»;

2) испытания для определения прочности на сжатие проводили на машине для испытания конструкционных материалов УТС 110М – 50 согласно ГОСТ Р 57606-2017 на образцах второго типа. Определение прочности на изгиб проводили по ГОСТ Р 57749-2017 методом трехточечного изгиба;

3) теплофизические испытания производили методом сравнения при комнатной температуре в лабораторных условиях с использованием измерителя «ИТ-30М» в интервале величин теплопроводности от 2,5 до 150 Вт/(мЖ), согласно ГОСТ Р – 54254 – 2010;

4) измерения твердости проводили на приборе ТРТС-10, методом Роквелла, при нагрузке 60 кгс с шариком диаметром 5 мм (HR5/60) в соответствии со стандартом DIN 51917;

5) микроскопический анализ осуществляли на сканирующем электронном микроскопе VEGA3 Tescan;

6) определение структурных характеристик (d_{002} , g , L_a , L_c) материала производилось на порошковом дифрактометре D8 Advance фирмы Bruker (Германия) с программным обеспечением TOPAS;

7) спектральное исследование проводили с помощью спектрометра комбинационного рассеяния – Enspecr R532 производства российской компании «Спектр-М» с длиной волны лазера 532 нм и максимальной мощностью лазера 50 мВт.

Третья глава посвящена исследованию влияния температуры финишной высокотемпературной обработки на свойства УУКМ на базе пековых матриц. В результате проведенных анализов получены зависимости физико-механических и теплофизических характеристик материала от температуры финишной термообработки.

Установлено, что с повышением температуры обработки происходит постепенное изменение степени совершенствования структуры материала и, как следствие, повышение его теплопроводности (рисунок 1).

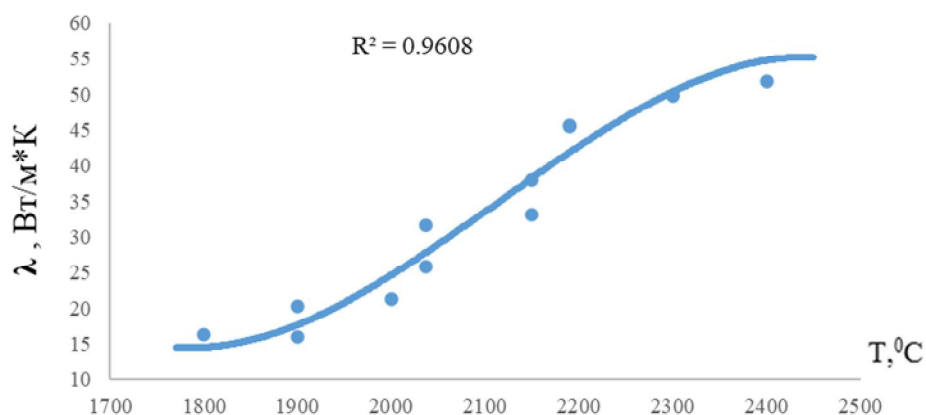


Рисунок 1 — Зависимость теплопроводности УУКМ на пековых матрицах от температуры финишной обработки

В результате увеличения температуры финишной термообработки (рисунок 2) в интервале температур 1800-2200°C у материала повышается предел прочности на изгиб.

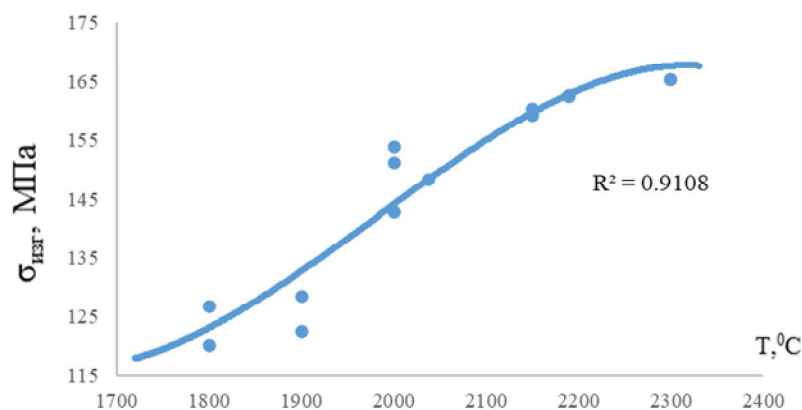


Рисунок 2 — Зависимость предела прочности на изгиб УУКМ на пековых матрицах от температуры финишной обработки

По результатам микроскопического анализа образцов УУКМ на пековых матрицах, прошедших высокотемпературную обработку при 1900°C и 2150°C, установлено, что для данного материала в обоих случаях область разрушения носит ступенчатый характер (рисунок 3). Однако, материал, подвергнутый финишной термообработке при 1900°C (рисунок 3 а, в), характеризуется более хрупким характером разрушения вдоль одной плоскости. Волокно и матрица образуют единую монолитную систему, поэтому материал разрушается как изотропный. Материал, прошедший термообработку при 2150°C (рисунок 3 б, г), распределяет напряжение по нескольким плоскостям, образуя больше ступеней в результате разрушения. Таким образом, у данного образца наблюдается

смешанный характер разрушения с выдергиванием и проскальзыванием волокон из матрицы, и, как результат, значение предела прочности на изгиб у него выше.

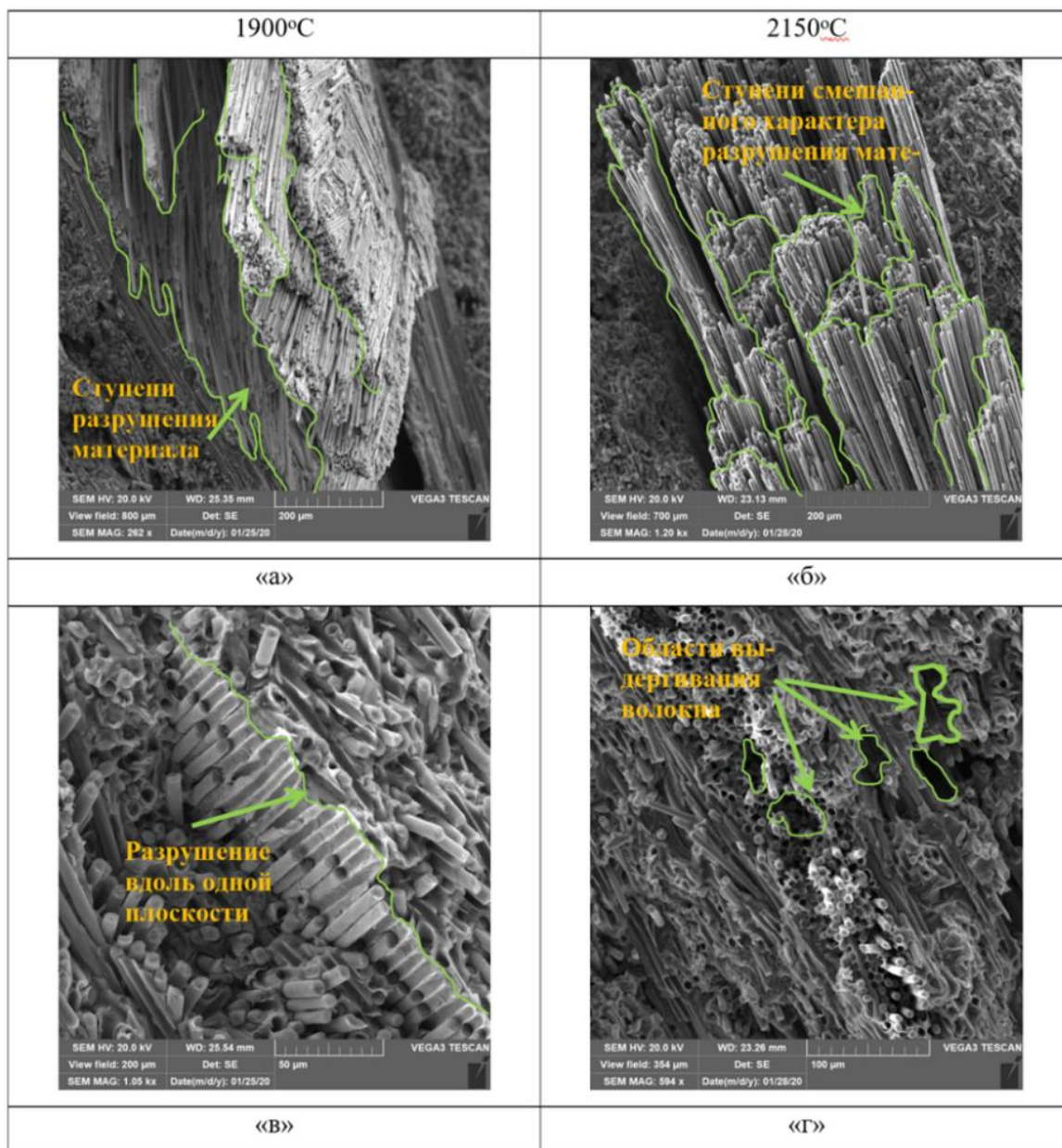
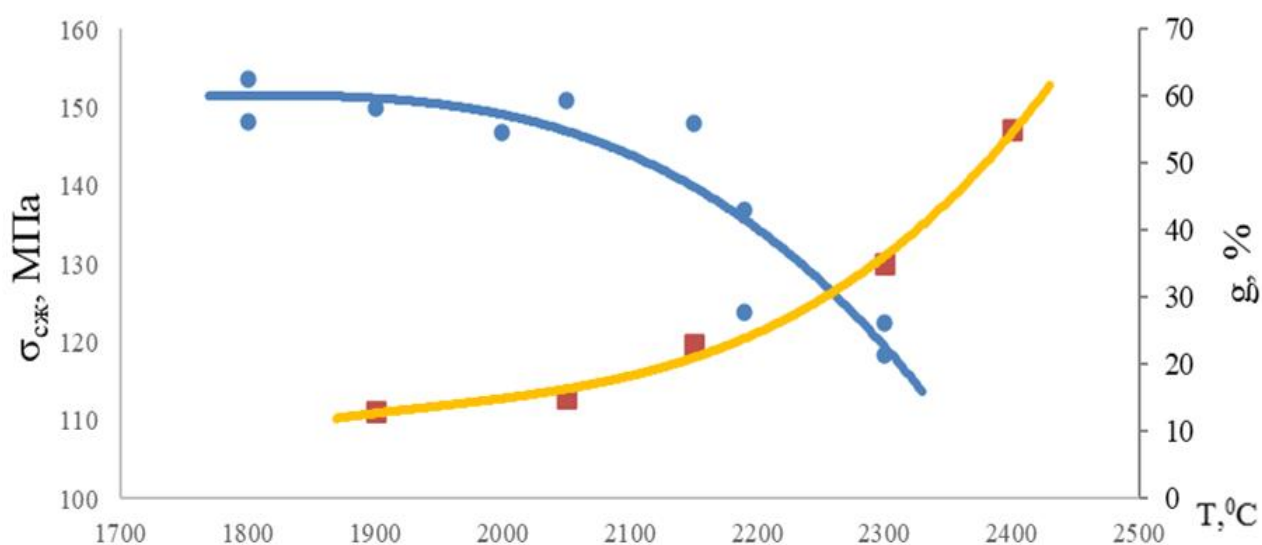


Рисунок 3 — Микрофотографии поверхностей разрушения образцов с высокой прочностью границы раздела «волокно-матрица» (температура финишной термообработки 1900°C) (а - увеличение 100X, в- увеличение 400X) и низкой прочностью границы раздела «волокно-матрица» (температура финишной термообработки 2150°C) (б - увеличение 115X, г- увеличение 400X)

Была выявлена зависимость предела прочности на сжатие УУКМ на пековых матрицах от температуры финишной термообработки (рисунок 4). С уменьшением межплоскостного расстояния матрица материала подвергается усадке, что, в свою очередь, приводит к образованию микродефектов, и, как

результат — к снижению предела прочности при сжатии. После температуры 2100°C начинает стремительно повышаться степень графитации материала, что и приводит к потере прочности.



● предел прочности на сжатие, МПа ■ степень графитации, g %

Рисунок 4 — Графики зависимости предела прочности при сжатии УУКМ и степени графитации УУКМ от температуры финишной термообработки

В четвертой главе проводилась оценка эффективности воздействия на структуру и свойства УУКМ процессов пропитки и карбонизации под давлением (ПКД) и пиролитического уплотнения.

Установлено, что плавный подъем температуры (со скоростью 15-20 °C/ч) в интервале 400-550°C на заготовках при максимальном приложенном давлении в большей степени обеспечивает мезофазные превращения пека, тем самым матрица материала становится более анизотропной. Получение анизотропной матрицы на этапе ПКД позволяет обеспечить более анизотропную структуру материала после финишной высокотемпературной обработки (рисунок 5) в области границы раздела волокно-матрица, тем самым обеспечивая больший уровень псевдопластичности и меньший уровень фрикционного износа.

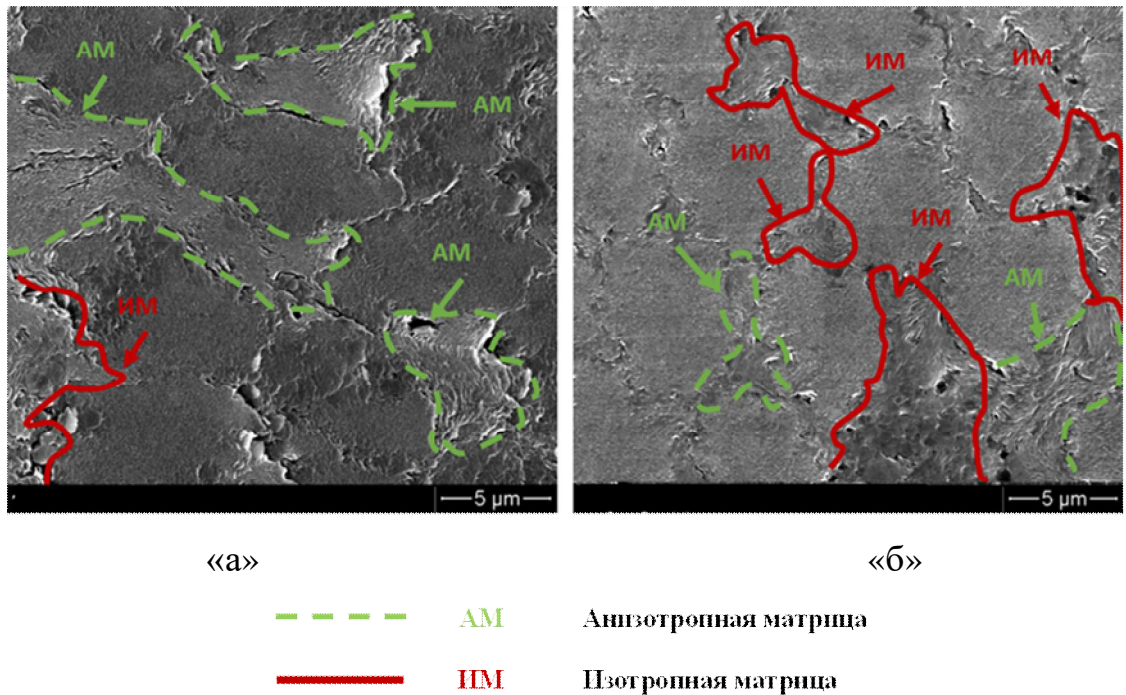


Рисунок 5 — Фотографии микроструктуры 2-х материалов после 3-х циклов ПКД и финишной высокотемпературной обработки при 2100°C: «а»- материал, полученный с учетом удаления низкомолекулярных продуктов и длительным подъемом температуры в интервале 400-550°C во время ПКД, «б»- материала, полученный без удаления низкомолекулярных летучих продуктов и быстрым подъемом температуры в интервале 400-550°C

Выделены основные температурные интервалы и условия проведения процесса ПКД для получения материала с анизотропной матрицей и повышенными прочностными характеристиками.

Исследование микроструктуры материала после нескольких циклов пропитки и карбонизации под давлением показало, что в структуре рассматриваемого УУКМ остаются открытые поры, а также зазоры между волокном и матрицей. Одним из эффективных методов заполнения пор и повышения показателя прочности материала является уплотнение пиролитическим углеродом (пироуглеродом).

На основе механизма топохимической реакции описана кинетика роста слоя пироуглерода на поверхности углеродного волокна. Конечное уравнение модели роста слоя пироуглерода на поверхности волокна выглядит следующим образом:

$$D_n = D_{n-1} + k_{\text{эф}} t_{\text{цикла}}, \quad (1)$$

$$\text{при } k_{\text{эф}} = \frac{2k_m p_{\text{СП4}}}{\rho},$$

где k_m - массовая константа скорости, ; $p_{\text{СН}_4}$ - парциальное давление источника, мм рт.ст.; r - плотность пироуглерода, кг/м³; D_n - диаметр филамента волокна с пироуглеродом после n-го цикла пироуплотнения, м; D_{n-1} - диаметр филамента волокна перед n-ным циклом пироуплотнения, м; $t_{\text{цикла}}$ - продолжительность цикла пироуплотнения, ч; $k_{\text{эф}}$ - эффективная константа скорости, м/ч.

Таким образом, исходя из полученного выражения (1), толщина слоя пироуглерода на филаменте углеродного волокна линейно связана со временем осаждения и, соответственно, с количеством циклов.

Установлена зависимость прироста предела прочности при сжатии от прироста плотности после пироуплотнения (рисунок 6).

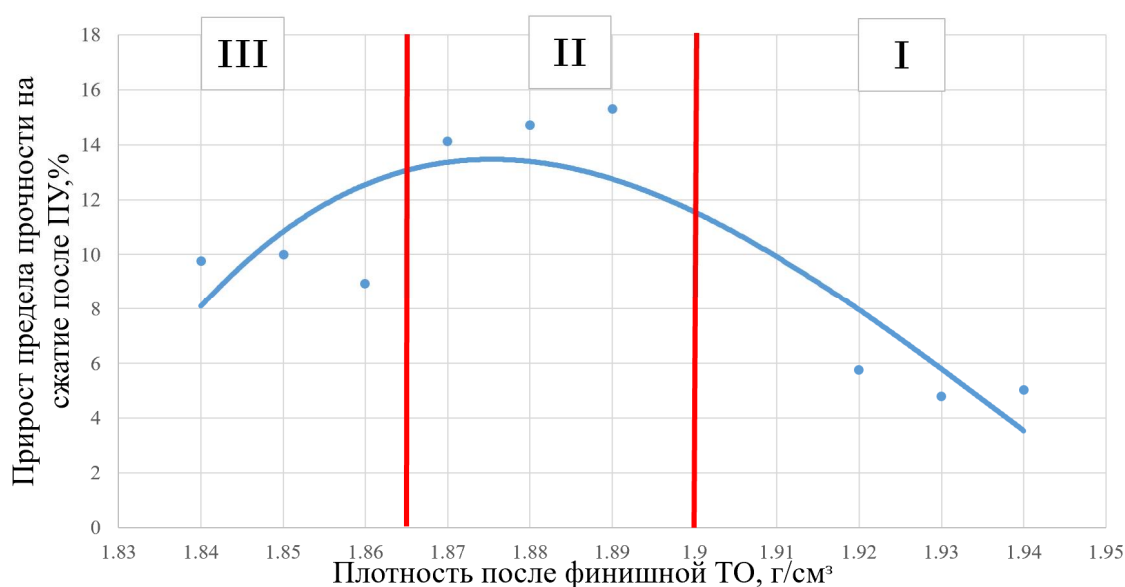


Рисунок 6 — Зависимость прироста прочности при сжатии от прироста плотности после пироуплотнения: область III— образцы начальной плотности 1,84-1,86 г/см³, область II — образцы начальной плотности 1,87-1,89 г/см³, область I — образцы начальной плотности 1,93-1,94 г/см³

Пироуплотнение наиболее эффективно повышает предел прочности при сжатии на 12-16 % образцов плотностью 1,87 - 1,89 г/см³ в области II на рисунок 6 при приросте плотности 1,5 - 2 %, так как у данных образцов пироуглерод заполняет преимущественно зазор между волокном и матрицей, а также микродефекты материала. У данных образцов в большей степени выражен эффект поверхностного упрочнения. Как результат, материал становится более

монолитным, и при разрушении в структуре присутствует меньше концентраторов напряжения.

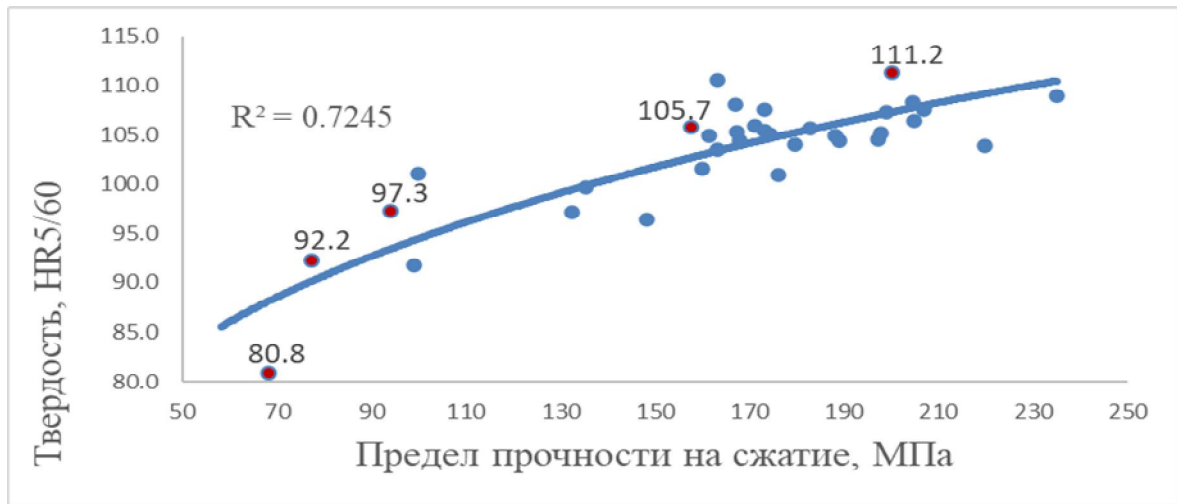
При небольшом приросте плотности порядка 0,5 - 1% после пироуплотнения на образцах изначально высокой плотности 1,93 - 1,94 г/см³ (рисунок 6 область I) не наблюдается ощутимого прироста прочности. Это связано прежде всего со структурой полученных образцов — поры малого диаметра и небольшой зазор между волокном и матрицей.

Образцы, обладающие плотностью 1,84 - 1,86 г/см³ (рисунок 6 область III), характеризуются порами большего диаметра, чем остальные рассматриваемые образцы. Для полного заполнения данных пор пироуглеродом требуется проводить несколько большее число циклов пироуплотнения.

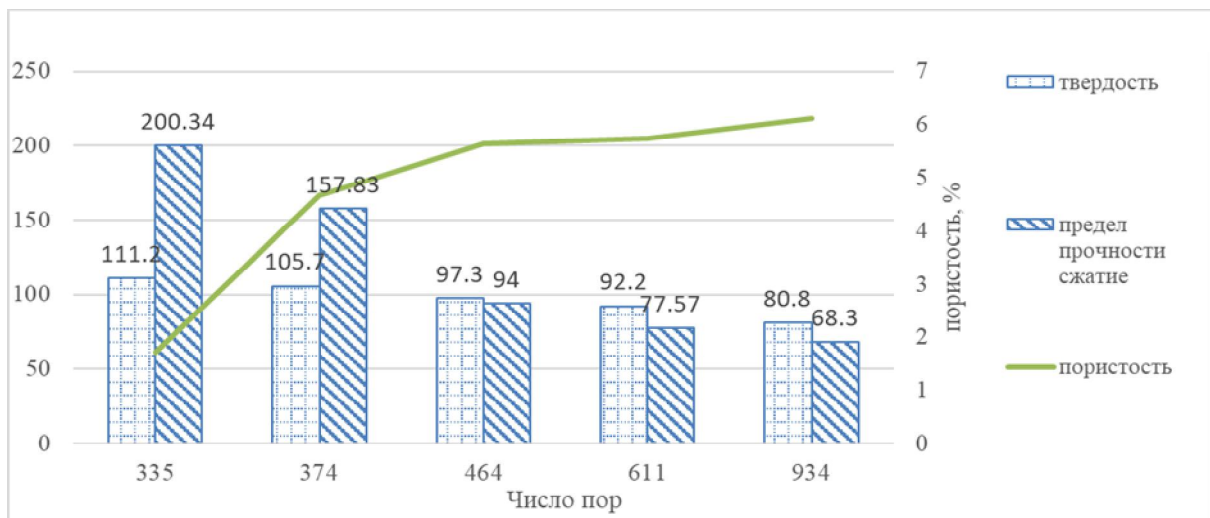
В **пятой главе** предложены методы неразрушающего контроля для рассматриваемого УУКМ.

Оценена возможность применения показателя твердости для контроля готовых изделий из УУКМ на базе каркаса из углеродного волокна и пековой матрицы, в частности для контроля предела прочности на сжатие (рисунок 7 а). Доказано, что твердость связана со структурой рассматриваемого материала (рисунок 7 б).

Полученные зависимости на рисунке 7 показывают, что образцы материалов, обладающих высокими значениями пористости (более 5%), а также характеризующиеся большим количеством пор обладают низкими значениями предела прочности на сжатие.



«а»



«б»

Рисунок 7 — Связь между твердостью и пределом прочности при сжатии («а») в зависимости от пористости материала («б»)

Имея массив статистических данных зависимости прочности, плотности, теплопроводности от твердости исследуемого материала, можно оценить его свойства, не прибегая к длительному процессу подготовки образцов для испытаний и не проводя разрушающий контроль.

Подтверждено, что спектроскопия комбинационного рассеяния (СКР) является мощным и перспективным методом для идентификации как самих углеродных материалов, так и их свойств.

У приведенных в таблице 1 спектров отношение интенсивностей аналитических линий D/G уменьшается с ростом конечной температуры

высокотемпературной обработки, что как раз свидетельствует о процессе совершенствования структуры материала. По полученным рамановским спектрам для УУКМ на базе каркаса из углеродного волокна и пековой матрицы можно определить наличие отклонений от режимов финишной высокотемпературной обработки.

Таблица 1. Образцы и температура финишной ТО

№	Конечная температура высокотемпературной обработки, °С	Отношение интенсивностей D/G	Спектр материала
1	1900	1,365	
2	2050	1,064	
3	2150	1,03	
4	2300	1	
5	2400	0,98	

При рекомендуемой температуре финишной высокотемпературной обработки 2100°С отношение интенсивностей пиков D/G должно быть в пределах $1,03 < D/G < 1,064$, в случае $D/G < 1$ можно судить о перегреве материала и нарушении режима работы оборудования. Также, определив истинную температуру высокотемпературной обработки УУКМ по отношению интенсивностей пиков D/G, можно предсказать значения прочности изделий одной партии, в соответствии с ранее представленными зависимостями на рисунок 1,2,4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов проведенных исследований сформулированы следующие **выводы**:

1. Теплопроводность в направлении, перпендикулярном поверхности УУКМ на пековых матрицах, возрастает с увеличением температуры финишной

термообработки в интервале температур 1800-2400°C. Кривая имеет s-образную форму, что свидетельствует о том, что наиболее важные структурные изменения в материале происходят в интервале температур 1900-2200°C.

2. Характер разрушения образцов рассматриваемого УУКМ определяется структурными изменениями материала, заложенными на стадии финишной высокотемпературной обработки.

3. Наблюдаемое снижение предела прочности на сжатие при увеличении температуры финишной термообработки объясняется стремительным повышением степени графитации при термообработке выше 2100°C, а также усадкой материала, приводящей к образованию микродефектов, по которым и происходит разрушение материала.

4. Для достижения наиболее высоких показателей физико-механических характеристик композитов на базе пековых матриц дискретно и хаотично армированных графитированными волокнами, отвечающих требованиям для их практического применения, требуется проводить финишную высокотемпературную обработку при 2100°C.

5. Предложенный режим ПКД направлен на замедление процесса в интервале температур 400-550°C для формирования анизотропной структуры матрицы за счет полных мезофазных превращений пека.

6. Установлено, что выбор способа уплотнения высокоплотных УУКМ зависит от структуры материала, в частности размера пор и их количества, наличия зазора между волокном и матрицей.

7. При повышении температуры термообработки происходит реструктуризация углеродного материала, что приводит к уменьшению количества дефектов и увеличению упорядоченности кристаллической решетки. Использование рамановской спектроскопии позволяет адекватно оценить изменения в структуре материала

8. Комплекс исследований с помощью СКР и определения твердости материала, коррелирующих с его физико-механическими и тепловыми

характеристиками, открывают возможности для сквозного неразрушающего контроля заготовок материала в технологических партиях.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ:

1. Влияние финишной высокотемпературной обработки на физико-механические и теплофизические свойства дискретно и хаотично армированного углерод-углеродного материала на базе пековых матриц / Кулаков В.В., Лучкин М.С., Иванова А.Н., Голубков А.К., Курасов Р.С., Аверин К.А., Бухаркина Т.В., Староверов Д.В. // Химическая промышленность сегодня. — 2020. — № 6. — С. 46–51 (**ВАК, ChemAbs**)

2. Влияние процесса пиролитического уплотнения на физико-механические свойства высокоплотных углерод-углеродных композиционных материалов на основе пековых матриц/ Кулаков В. В., Панков М. И., Лучкин М. С., Сивурова В.А., Голубков А.К., Шмелев Д.С. // Справочник. Инженерный журнал. — 2021. — №. 10. — С. 3–9. (**ВАК**)

3. Kinetics of pyrocarbon formation on the surface of carbon fiber filament / Bukharkina T.V., Shishanov M.V., Luchkin M.S., Golubkov A.K., Vologdina A.A. // Solid Fuel Chemistry (English Translation of Khimiya Tverdogo Topliva). — 2024. — Vol. 58, no. 3. — P. 189–195. (**Scopus**)

4. Применение рамановской спектроскопии для анализа углеродных материалов/ М. В. Шишанов, М.С. Лучкин, Морозов А.А., Хачатурян А.А., Иванова А.Н., Данилов Е.А., Голубков А.К. // Кокс и химия. — 2024. — № 10.— С. 40-48. (**ВАК, Scopus**)

5. Бухаркина Т.В., Лучкин М.С. Влияние высокотемпературной обработки на механические и теплофизические свойства углерод-углеродного композиционного материала // XIX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования». Санкт-Петербургский горный университет. 2021 г.—Том 2— С. 120-123.

6. Лучкин М. С., Бухаркина Т. В., Шишанов М. В. Зависимость теплопроводности углерод-углеродного композиционного материала от финишной температуры высокотемпературной обработки. // Молодёжный форум:

актуальные вопросы современной науки: сборник статей Международной научно-практической конференции. – г. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2024. – 88 с. — С.10 – 13.

7. Лучкин М. С., Бухаркина Т. В. Модель роста слоя пиролитического углерода на поверхности углеродного волокна // Eurasiascience LIX МНПК. — ООО «Актуальность. РФ» г. Москва: 2024. — С. 136–137.

8. Шишанов М. В., Лучкин М. С., Лизунова А. С., Брагина К. С., Установление изменения структуры углерод-углеродных материалов методом комбинационного рассеяния // XIII Международная научно-практическая конференция «Студенческий научный форум 2024». — г. Пенза: МЦНС «Наука и просвещение»: 2024. — С. 3.

9. Лучкин М. С., Бухаркина Т. В., Шишанов М. В. Влияние способа финишного уплотнения углерод-углеродного композиционного материала на базе пековых матриц на прирост плотности и прочности // VI Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки и образования»— АНО ДПО «ЦРОН», г. Москва, 2024 — С. 100 – 104.

10. Лучкин М.С., Шишанов М.В., Бухаркина Т.В., Голубков А.К. Применение показателя твердости для оценки физико-механических характеристик углерод-углеродного композита// XX Международный конгресс по химии и химической технологии — Москва, 2024 — С. 43-45.

11. Пат. 2808969 Российская Федерация, МПК С04В35/532, С04В35/83. Способ пропитки и карбонизации под давлением пористых углерод-углеродных заготовок на основе пековых связующих / Кулаков В.В., Лучкин М.С., Панков М.И., Шмелев Д.С., Курасов Р.С., Шатохин В.С.; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество «Авиационная корпорация «Рубин» - № 2022135335; заявл. 30.12.2022; опубл. 05.12.2023 — 12 с.