

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента на диссертацию**  
**Лучкина Максима Сергеевича**  
**на тему «Углерод-углеродный композиционный материал на базе**  
**пековых матриц с повышенными физико-механическими**  
**характеристиками», представленной на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**  
**по специальности 2.6.12. Химическая технология топлива и**  
**высокоэнергетических веществ**

**Актуальность темы диссертационной работы.** Современные области машиностроения предъявляют повышенные требования к конструкционным материалам. Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), сочетая в себе прочность углеродных волокон и химические свойства углеродной матрицы, позволяют получать лёгкие и прочные изделия с высокими эксплуатационными характеристиками в широких диапазонах температур. Изменяя условия проведения и последовательность технологических операций получения УУКМ можно влиять на свойства получаемых композитов. Диссертационная работа посвящена актуальному вопросу получения материалов на базе пековых матриц с улучшенными физико-механическими характеристиками путем оптимизации режимов технологических операций их производства. Представленная к защите диссертационная работа имеет ярко выраженное практическое значение, поскольку изделия на основе углерод-углеродных композитов с повышенными характеристиками необходимы при производстве отечественных авиационных тормозов новых конструкций. В связи с этим, разработка УУКМ, которой посвящена диссертационная работа Лучкина М.С., обладает несомненной актуальностью.

**Новизна и практическая значимость проведенных исследований и полученных результатов.** В работе показано, что основной вклад в формирование структуры УУКМ вносят режимы пропитки и карбонизации под давлением и последующая высокотемпературная обработка. Предложен и запатентован режим пропитки и карбонизации под давлением, позволяющий получать материалы с меньшим количеством микродефектов. Выбрана температура высокотемпературной финишной обработки углеродного материала на базе пековых матриц армированных углеродными волокнами для получения материалов с высокими физико-механическими

характеристиками. Предложена методика сквозного неразрушающего контроля изделия по косвенному определению прочностных характеристик углерод-углеродных композиционных посредством измерения их твердости.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследований опубликованы и апробированы в 11 научных работах: 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах, 1 статья, индексируемая в ВАК, 6 работ в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов, получен 1 патент РФ.

### **Анализ содержания диссертационной работы**

Представленная к защите диссертация изложена на 103 страницах и содержит 91 библиографическую ссылку. Текстовый материал проиллюстрирован 43 рисунками и 6 таблицами. Диссертация имеет традиционную структуру и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во введении отражены актуальность и степень разработанности темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, обозначены научная новизна и практическая значимость. Также приведены методы исследования и положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена литературному обзору по теме исследования. Описаны основные технологические стадии получения углерод-углеродных композиционных материалов; рассмотрено влияние режимов высокотемпературной термообработки на финишные свойства УУКМ и влияние процессов пропитки пеком и карбонизации под давлением на структуру и свойства композиционных материалов на основе пековых матриц; представлены методы анализа структуры и свойств УУКМ. Обзор написан хорошим литературным языком, легко читается и дает достаточно полное представление о свойствах и стадиях получения исследуемых материалов. Литературный обзор завершается выводами.

Во второй главе описаны объекты и методы исследования, среди которых испытания для определения пределов прочности на сжатие и на изгиб, методы определения теплопроводности и твердости, рентгенофазовый анализ, сканирующая электронная микроскопия, спектроскопия комбинационного рассеивания.

В третьей, четвертой и пятой главах диссертации представлены основные полученные в работе экспериментальные результаты и в конце каждой главы сформулированы промежуточные выводы. Хочется отметить выстроенную логику работы, каждый следующий шаг обоснован благодаря анализу собственных и литературных данных.

Третья глава посвящена исследованию влияния температуры финишной высокотемпературной обработки (1700-2300°C) на свойства углерод-углеродных материалов на базе пековых матриц. Установлено, что увеличение температуры финишной обработки способствует увеличению теплопроводности материала с одновременным уменьшением твердости. Показано, что повышение температуры финишной обработки приводит к повышению прочности на изгиб и уменьшению прочности на сжатие образцов УУКМ. Подтверждено, что с увеличением температуры финишной термообработки повышается степень графитации УУКМ на пековых матрицах, уменьшается межплоскостное расстояние  $d_{002}$ , происходит рост кристаллитов, что приводит к увеличению прочности на изгиб.

В четвертой главе исследовано влияние других технологических переделов производства (таких как пропитка и карбонизация под давлением (ПКД) и пиролитическое уплотнение) на свойства и структуру углерод-углеродных материалов на базе каркаса из углеродного волокна и пековой матрицы. Определены условия проведения процесса ПКД для получения материала с повышенными прочностными характеристиками. Детально исследовано влияние режима процесса пиролитического уплотнения на свойства и структуру углерод-углеродных композиционных материалов. Предложена модель роста слоя пироуглерода на поверхности волокна. Построены зависимости прироста твердости образцов УУКМ после процесса пиролитического уплотнения. Установлено, что выбор способа уплотнения высокоплотных УУКМ зависит от плотности и структуры материала. Показано, что материалы с плотностью 1,84 - 1,86 г/см<sup>3</sup> эффективнее уплотнять путем пропитки пеком и карбонизации под давлением. Для материалов плотности выше 1,87 г/см<sup>3</sup> наиболее оптимальным способом уплотнения является насыщение материала пиролитическим углеродом из газовой фазы.

Пятая глава посвящена применению методов неразрушающего контроля для УУКМ. Оценена возможность применения показателя твердости для контроля предела прочности на сжатие для углерод-углеродных материалов на базе каркаса из углеродного волокна и пековой матрицы, не прибегая к длительному процессу подготовки образцов для испытаний, и не проводя разрушающий контроль. Метод построения карты твердости можно использовать при проведении контроля образцов УУКМ.

Изложенная выше высокая оценка работы отнюдь не означает, что она идеальна и лишена каких-либо недостатков. Основные замечания и требующие дополнительного пояснения вопросы приведены ниже.

1. В таблице 6 на стр. 72 приведены характеристики образца УУКМ, полученного по предложенному автором в качестве оптимально режима пропитки и карбонизации под давлением и финишной высокотемпературной обработки (образец 1). Эти характеристики сравниваются с аналогичными характеристиками других образцов (режим 2, 3, 4, 5), полученных «по предыдущим режимам, применяемым ДО проведения исследований». Из текста работы остается неясным, эти режимы апробированы в работе или это литературные данные.

2. Важным параметром, характеризующим качество углерод-углеродного композиционного материала, является его пористость. Хотя в работе представлены значения пористости для образца, полученному при предложенном режиме процесса пропитки и карбонизации под давлением (режим 1, таблица 6, стр.72), однако в методической части работы вообще не упоминается о методе определения пористости. Вероятно, здесь речь идет об открытой пористости, определенной методом гидростатического взвешивания.

3. В следующей части работы (стр.80 и стр.86) приведена пористость образцов, полученная при помощи данных сканирующей электронной микроскопии. Но и эта методика определения пористости не представлена в методической части. Коррелируют ли между собой полученные разными методами значения плотности?

4. На рис. 40 представлена зависимость твердости, прочности на сжатие и пористости от количества пор в образце. Количество пор для разных образцов составляет 335, 374, 464, 611 и 934. Как определены эти значения, каковы ошибки определения?

5. На стр. 52 на основании анализа двух микрофотографий поверхностей разрушения образцов УУКМ, полученных при разных температурах финишной термообработки, делается вывод «о более хрупком характере разрушения» для образца, полученном при 1900С. Полагаю, что только по микрофотографиям сложно судить о характере разрушения образца. Представляется интересным привести в тексте диссертации экспериментальные кривые напряжение – деформация, которые позволяют более полно проанализировать характер разрушения материала.

6. В экспериментальной части работы объектом исследования являются углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), но в четвертой главе диссертации упоминаются фрикционные композиционные углеродные материалы (ФКУМ), хотя фрикционные свойства в работе не обсуждаются. Очевидно, что в рамках работы это синонимы, но в тексте диссертации хотелось бы единства терминологии.

Отмеченные замечания не являются критическими и не умоляют достоинств работы. Общий высокий уровень диссертации не вызывает сомнений. Основные результаты работы и сформулированные автором на их основании выводы вполне обоснованы, их высокий научный уровень подтверждают публикации в рецензируемых журналах и апробация на научных конференциях

Диссертационная работа М.С. Лучкина является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании экспериментальных и теоретических исследований предложены пути решения актуальной проблемы разработки углерод-углеродного материала на базе каркаса из углеродного волокна и пековой матрицы с повышенными физико-механическими характеристиками.

Тема диссертационной работы, ее основные научные положения, результаты и выводы полностью соответствуют паспорту специальности 2.6.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ. Автореферат соответствует структуре и содержанию диссертации.

Диссертационная работа соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденного приказом №103 ОД от 14.09.2023 г. (с последующими редакциями), а её автор Лучкин М.С. заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ.

Официальный оппонент:

кандидат химических наук,  
доцент кафедры химической технологии и новых материалов Химического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова»

Максимова Наталья Владимировна

«27» декабря 2024 г.

