

**Отзыв официального оппонента  
на диссертационную работу Каледина Алексея Владимировича «Композиционные материалы на основе карбида кремния, тугоплавких металлов и их силицидов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»**

**Актуальность диссертации** определяется необходимостью создания новых высокотемпературных конструкционных материалов, способных сохранять работоспособность в условиях интенсивного температурного воздействия, окислительных сред и механических нагрузок. К числу наиболее перспективных материалов такого назначения относятся керамоматричные композиционные материалы на основе карбида кремния, обладающие высокой жаростойкостью, химической стойкостью, сравнительно низкой плотностью и стабильностью структуры при повышенных температурах.

Несмотря на очевидные преимущества карбидокремниевой керамики, ее практическое применение в качестве конструкционного материала ограничивается хрупким характером разрушения. Поэтому разработка новых подходов, направленных на модифицирование матрицы за счет введения армирующих элементов и изучение межфазного взаимодействия, представляет собой важное направление современного материаловедения.

**Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 153 страницах, содержит 75 рисунков и 27 таблиц. Список цитируемой литературы включает 209 источников.

Материал диссертации изложен последовательно: от анализа современного состояния проблемы и выбора научно-технического подхода к получению материалов до экспериментального исследования их структуры, свойств и высокотемпературного поведения. Такая логика построения работы позволяет проследить взаимосвязь между составом, способом получения, микроструктурой, фазовым составом и эксплуатационно значимыми характеристиками разработанных материалов.

**Введение** содержит обоснование актуальности темы, формулировку цели и задач исследования, положения научной новизны и практической значимости. В нем достаточно полно обозначены основные научные проблемы, решаемые в диссертации. Цель работы сформулирована корректно и соответствует содержанию проведенных исследований. Поставленные задачи охватывают технологические, структурные, механические и расчетно-аналитические ас-

пекты, что позволяет рассматривать диссертацию как законченное комплексное исследование.

**В первой главе** рассмотрен современный уровень исследований о карбидокремниевой керамике и керамоматричных композиционных материалах на ее основе. Автор анализирует основные преимущества карбидокремниевой керамики, включая высокую жаростойкость, химическую инертность и стабильность при нагреве, а также показывает ограничения, связанные с хрупкостью традиционных керамических материалов.

На основании проведенного анализа автор формулирует направления дальнейших исследований и обосновывает выбор объектов диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена разработке способа получения изотропной композиционной керамики на основе карбида кремния и дисилицида молибдена и исследованию полученных материалов. Описаны исходные сырьевые компоненты, технологические подходы и методы получения образцов, а также результаты их исследования. Продемонстрировано, что в разработанных композиционных керамиках, полученных способом, основанным на методе жидкофазного силицирования, доля свободного кремния существенно ниже, чем в реакционно-связанной керамике и силицированных графитах. Это имеет важное прикладное значение для повышения химической стойкости такого класса материалов, обеспечивая их работу в условиях щелочных сред.

**В третьей главе** представлены результаты получения и исследования слоистых композиционных материалов на основе SiC с использованием фольг тугоплавких металлов. Показана качественная оценка степени влияния их введения на прочностные характеристики керамики. Продемонстрировано, что предел прочности на изгиб по сравнению с карбидокремниевой керамикой того же состава, что и матрица исследуемого композита, существенно выше. Кроме того, разработанные материалы имеют другой характер разрушения. Полученные результаты демонстрируют перспективность такого подхода для создания высокотемпературных слоистых материалов.

**В четвертой главе** описывается разработка способа получения керамоматричных материалов, армированных молибденовой проволокой различного диаметра, изучено влияние введения армирующего элемента на структуру и свойства карбидокремниевой керамики. Выполнено исследование микроструктуры полученных образцов, включая анализ границы раздела между матрицей и молибденовой проволокой. Проведены испытания на изгиб при комнатных и повышенных температурах. Полученные данные показывают, что армирование молибденовой проволокой является эффективным способом

модифицирования структуры, увеличения предела прочности и изменения характера разрушения керамики.

**В пятой главе** исследовано влияние высокотемпературного воздействия на изменение структуры армирующих элементов в виде молибденовых проволок, а именно рассмотрены закономерности роста силицидных слоев  $\text{MoSi}_2$  и  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$ . В экспериментальной части автор количественно оценивает изменение толщины реакционного слоя при заданных температурно-временных условиях. Также в главе приведены результаты численного моделирования процессов тепломассопереноса, происходящих в образцах керамических композитов, в результате чего предложена расчетно-экспериментальная методика прогнозирования изменения толщины силицидного слоя и диаметра остаточного металла.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в комплексном исследовании керамоматричных композиционных материалов на основе системы  $\text{SiC-C-Si-Me}$ .

К числу наиболее существенных научных результатов следует отнести новые подходы к получению высокотемпературных армированных керамик, а также продемонстрированную возможность формировать плотную керамику с минимальным содержанием свободного кремния в композиционном материале, применяя при этом метод жидкофазного силицирования. Также новым и практически значимым является подход к исследованию изменения структуры армированных КМК при высокотемпературных воздействиях в условиях нестационарных процессов.

Полученные результаты развивают представления о композиционных материалах на основе карбидокремниевой керамики с тугоплавкими металлическими элементами и могут быть использованы при дальнейших разработках высокотемпературных материалов.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается применением современных методов исследования структуры, фазового состава и механических свойств, а также сопоставлением экспериментальных данных с расчетными оценками и известными результатами из литературных источников. Использование комплекса методов анализа позволяет подтвердить наличие основных фаз и оценить особенности микроструктуры.

Основные положения диссертационной работы апробированы на научных мероприятиях и отражены в четырех публикациях автора, изданных в журналах, входящих в перечень ВАК. Представленные материалы свидетельствуют о том, что полученные результаты прошли необходимое научное обсуждение и могут рассматриваться как обоснованные.

## **Замечания по диссертационной работе**

При общей положительной оценке работы возникают следующие замечания и вопросы:

1. В работе подробно исследованы прочностные характеристики разработанных материалов, однако оценка трещиностойкости армированных композитов не проведена. Между тем для керамоматричных материалов данный показатель является принципиально важным, поскольку именно сопротивление распространению трещин во многом определяет эффективность армирования.

2. Представляет интерес вопрос о работоспособности разработанных армированных композитов в окислительной среде после разрушения керамической составляющей. Поскольку несущая функция в этом случае в значительной степени переходит к молибденсодержащим элементам, а молибден, как известно, подвержен окислению при повышенных температурах, целесообразно было бы дополнительно оценить поведение таких материалов в условиях высокотемпературного окисления после нарушения целостности керамической матрицы.

3. Для слоистых композиционных материалов существенный интерес представляет оценка прочности при сдвиге. Поскольку для материалов данного типа одним из определяющих факторов работоспособности является сопротивление сдвиговым деформациям и разрушению по межфазным границам, включение таких испытаний позволило бы более полно охарактеризовать механические свойства разработанных композитов.

4. В работе показано, что введение молибдена приводит к снижению доли свободного кремния, что должно способствовать повышению химической стойкости материала. Вместе с тем соответствующая экспериментальная оценка в автореферате не представлена. В этой связи было бы полезно дополнить исследование результатами коррозионных испытаний, например, по изменению массы образцов в щелочной или кислотной среде, что позволило бы напрямую подтвердить заявленное преимущество разработанных изотропных композитов.

## **Заключение**

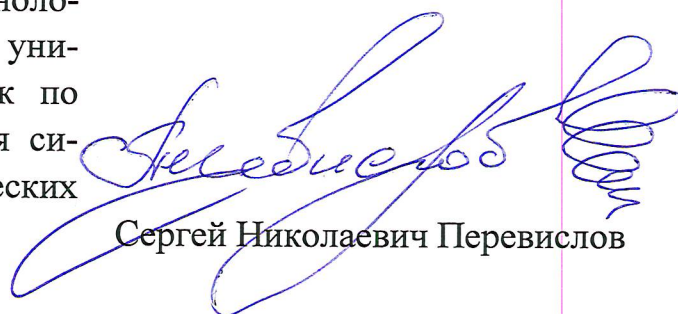
Диссертационная работа Каледина Алексея Владимировича выполнена на высоком научном уровне, автором получены оригинальные результаты, имеющие значение для развития технологических основ получения керамоматричных композитов на основе карбида кремния, армированных элементами из тугоплавких металлов и их силицидов. Автореферат и опубликованные статьи в полной мере отражают содержательную часть работы.

Диссертация представляет собой завершённое научно- квалификационное исследование, посвящённое актуальным проблемам материаловедения, и соответствует паспорту специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния», а также полностью удовлетворяет требованиям, установленным ВАК и «Положением о присуждении ученых степеней», утверждённым Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

**Официальный оппонент:**

Профессор кафедры химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), доктор технических наук по специальности 05.17.11 – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов



Сергей Николаевич Перевислов

Тел.: +7 (904) 551-49-55

E-mail: perevislov@mail.ru

Даю свое разрешение на обработку персональных данных и публикацию отзыва в сети Интернет.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет).

Адрес: 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 24-26/49 литера А

Тел.: +7 (812) 494-93-39.

E-mail: [office@spbti.ru](mailto:office@spbti.ru).

05.05.2026 г.

Подпись Перевислова С.Н.  
Начальник отдела Т.Ю. Брохорова



Т.Ю. Брохорова