

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института структурной
макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мержанова Российской академии наук
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН



М.И. Алымов

М.И. Алымов

2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Каледина Алексея Владимировича
«Керамоматричные 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 темы диссертационной работы

Керамика на основе SiC имеет высокую твёрдость, износостойкость и теплопроводность при низком коэффициенте термического расширения, относительно высокую механическую прочность при высокой температуре, вплоть до 1500 °С, хорошие антифрикционные свойства и относительно низкую плотность (от 2,3 до 3,2 г/см³). Этот материал обладает химической инертностью и высокой термической, коррозионной и радиационной стойкостью, что обеспечивает возможность длительной эксплуатации изделий из SiC керамики в условиях высоких температур, механических нагрузок, агрессивных сред и абразивного воздействия. В то же время, применение SiC керамики в изделиях, воспринимающих растягивающие, знакопеременные циклические и ударные нагрузки, ограничивается относительно высокой хрупкостью, низкой трещиностойкостью материалов. Увеличить трещиностойкость керамики на основе карбида кремния можно при помощи армирования керамической матрицы волокнами из углерода и SiC, однако эти технологии дороги и трудозатратны. Несмотря на достижения в области получения керамоматричных конструкционных материалов и изделий из них,

разработка новых композитов на основе SiC, а также изучение особенностей формирования их структуры и свойств остаются актуальными задачами. Реакционносвязанный SiC и силицированные графиты могут послужить базой для разработки керамоматричных композитов, а примененный в данной работе метод жидкофазного силицирования пористых металлоуглеродных заготовок — обеспечить технологичность и относительно низкую себестоимость получения изделий сложной формы. Использование тугоплавких металлов в качестве армирующих элементов позволяет существенно снизить стоимость композитов по сравнению с композитами «керамика-керамика», в которых SiC матрица армируется SiC волокнами.

Структура диссертационной работы и её основные положения

Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов и результатов работы, списка использованной литературы. Содержание диссертации изложено на 153 страницах, иллюстрировано 75 рисунками и 27 таблицами. Список цитируемой литературы включает 209 источников.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость работы. Цель исследования соответствует содержанию диссертации и направлена на решение актуальной научно-технической задачи, связанной с созданием и изучением композиционных материалов на основе SiC-керамики с применением в качестве армирующей фазы тугоплавких металлов и их силицидов.

В первой главе проведен анализ литературных источников, который подтверждает актуальность исследований для создания новых конструкционных керамических композитов на основе SiC и способов их получения. Сделан вывод, что выбранное в настоящей работе направление — получение изотропных, слоистых и непрерывно армированных композиционных материалов на основе SiC с армирующими элементами из молибдена и его силицидов — является научно обоснованным и перспективным с точки зрения развития термостойких керамоматричных систем.

Во второй главе представлены исходные материалы и методы получения изотропных композиционных материалов на основе SiC-керамики с силицидным компонентом. Автором продемонстрирован способ получения изотропной композиционной керамики на основе SiC и MoSi₂, изучены её фазовый состав, микроструктура и механические характеристики. Показано, что механическая прочность разработанных материалов существенно выше, чем в базовой SiC-керамике, полученной на основе жидкофазного

силицирования графитовых заготовок. При этом, доля свободного кремния в композиционной керамике существенно снижается за счет его замещения на дисилицид молибдена.

В третьей и четвертой главах представлены результаты разработки слоистых и непрерывно армированных композиционных материалов с использованием молибденовой фольги и проволоки. Показано, что введение металлических армирующих элементов позволяет изменить характер разрушения материала и повысить его предел прочности. Сформированный в результате жидкофазного силицирования переходный силицидный слой на границе раздела «матрица — металл» связывает армирующий элемент с керамической матрицей. При этом продемонстрировано, что толщина силицидного слоя постоянна, а доля армирования получаемых композитов может варьироваться за счет использования армирующих элементов различного размера.

В пятой главе исследовано влияние высокотемпературной выдержки на структуру силицидного слоя, формирующегося при взаимодействии молибдена с кремнийсодержащей матрицей. Рассмотрены особенности роста слоев MoSi_2 и Mo_5Si_3 , выполнено моделирование диффузионных процессов и проведено сопоставление расчетных данных с экспериментальными результатами. Этот раздел является важной частью работы, поскольку позволяет перейти от описания полученных структур к пониманию механизмов их изменения при высокотемпературном воздействии.

В ходе выполнения диссертационной работы автором получены следующие основные результаты:

- разработаны новые способы получения керамоматричных композиционных материалов на основе карбида кремния, молибдена и его силицидов;
- установлена степень влияния наличия силицидных фаз на механические свойства изотропной SiC-керамики;
- показана возможность получения слоистых и непрерывно армированных материалов с использованием элементов из тугоплавких металлов, что расширяет представления о возможностях повышения работоспособности хрупких керамических матриц;
- экспериментально исследовано влияние высоких температур на изменение размеров силицидных слоев на границе взаимодействия молибдена с кремнийсодержащей матрицей;
- предложен расчетный подход к оценке роста силицидных слоев, позволяющий прогнозировать изменение структуры материала при высокотемпературном воздействии.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна заключается в оригинальных подходах к получению керамоматричных композитов с армирующими элементами из тугоплавких металлов, а также их комплексном исследовании с учетом высокотемпературных диффузионных процессов, протекающих в структуре таких материалов. Разработанная расчетно-экспериментальная методика оценки изменения толщины силицидного слоя имеет значение для прогнозирования поведения армированных керамоматричных композитных материалов в условиях длительного нестационарного нагрева.

Практическая значимость результатов диссертационной работы

Практическая значимость состоит в том, что предложенные подходы могут быть использованы при создании керамоматричных материалов с повышенной устойчивостью к растягивающим напряжениям. Работа ориентирована не только на получение лабораторных образцов, но и на формирование научно-технологических предпосылок для разработки керамоматричных материалов с заданной архитектурой структуры. Результаты могут быть использованы при разработке высокотемпературных конструкционных материалов на основе карбида кремния, предназначенных для работы в условиях нагрева, окислительных сред и разнородных механических нагрузок.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности, по которой она рекомендуется к защите

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния» (технические науки), поскольку направлена на экспериментальное и теоретическое исследование процессов формирования структуры и свойств керамоматричных композиционных материалов на основе SiC с тугоплавкими металлами и их силицидами. В работе рассматриваются закономерности диффузионного взаимодействия в системе Mo-Si, а также влияние высокотемпературной обработки на структуру и свойства материалов, что непосредственно относится к направлениям исследований, связанным с изучением физической природы и свойств неорганических соединений (пункт 1 паспорта специальности), исследованиям поведения материалов при высоких температурах (пункт 2 паспорта специальности), созданию основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами (пункты 4, 5, 7 паспорта специальности). В частности, анализ диффузионного роста силицидных слоёв и численное моделирование процессов тепломассопереноса в разработанных композиционных материалах

согласуется с современными представлениями о механизмах межфазного взаимодействия в системе Mo-Si.

Достоверность результатов исследования

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современного научно-лабораторного оборудования и аттестованных методик исследований структуры и свойств материалов, хорошей воспроизводимостью, сопоставлением с результатами других исследователей, а также публикациями в научных журналах и докладами на конференциях.

Личный вклад автора в получение результатов исследования

Результаты представленной работы получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор принимал участие в постановке задач, выборе методов и подходов их решения, численном моделировании, проведении экспериментов, и анализе 6 полученных результатов. Автор внес основной вклад в написание статей и оформление патентов на изобретение. Автор лично докладывал результаты работ на конференциях.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати.

По результатам диссертационной работы опубликовано 4 печатные работы, входящие в перечень ВАК РФ, получено 4 патента РФ:

1. Kaledin, A.V. Fabrication of Layered SiC/C/Si/MeSi₂/Me Ceramic–Metal Composites via Liquid Silicon Infiltration of Metal–Carbon Matrices / A.V. Kaledin, S.L. Shikunov, J.N. Zubareva, I.M. Shmytko, B.B. Straumal, V.N. Kurlov // *Materials*. – 2024. – Vol. 17. Iss. 3. – P. 650.

2. Kaledin, A. SiC-based composite material reinforced with molybdenum wire / A. Kaledin, S. Shikunov, K. Komarov, B. Straumal, V. Kurlov // *Metals*. – 2023. – Vol. 13. – P. 313.

3. Шикунов, С.Л. Керамический композит на основе карбида кремния, армированного молибденовой проволокой / С.Л. Шикунов, А.В. Каледин, Ю.Н. Зубарева, Д.Г. Меликянц, В.Н. Курлов // *ЖТФ*. – 2026. – Т.96, №2. – С. 288–295.

4. Shikunov, S. Novel method for deposition of gas-tight SiC coatings / S. Shikunov, A. Kaledin, I. Shikunova, B. Straumal, V. Kurlov // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13. – P. 354.

5. Патент № 2818920 Российская Федерация, МПК B22F 7/02, C04B 35/565. Высокотемпературный реакционносвязанный слоистый композит на

основе SiC керамики, тугоплавкого металла и его силицидов и способ его получения: № 2818920: заявл. 06.06.2023: опубл. 05.02.2024 / Каледин А.В., Шикунов С.Л., Шикунова И.А., Курлов В.Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН). – 9 с.: 4 ил. // Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2818920C1/ru?oq=RU2818920> (дата обращения: 19.02.2026).

6. Патент № 2828381 Российская Федерация, МПК C04B 35/577, C04B 35/573, C04B 35/80, C22C 49/10. Способ получения композитного материала с многокомпонентными силицидами: № 2023134153: заявл. 20.12.2023: опубл. 10.10.2024 / Горнакова А.С., Страумал Б.Б., Когтенкова О.А., Курлов В.Н., Шикунова И.А., Каледин А.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН). – 7 с.: 2 ил. // Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2828381C1/en?oq=RU+2828381> (дата обращения: 19.02.2026).

7. Патент № 2819997 Российская Федерация, МПК C04B 35/577, C04B 35/573, C04B 35/80. Высокотемпературный реакционно-связанный композиционный материал на основе карбидокремниевой керамики, проволоки молибдена и его силицидов и способ его получения: № 2023119312: заявл. 20.07.2023: опубл. 28.05.2024 / Каледин А.В., Шикунов С.Л., Шикунова И.А., Курлов В.Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН). – 9 с.: 3 ил. // Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2819997C1/ru?oq=RU+2819997> (дата обращения: 19.02.2026).

8. Патент № 2788686 Российская Федерация, МПК C04B 35/573, C04B 35/65, C04B 35/532. Композиция для высокотемпературной керамики и способ получения высокотемпературной керамики на основе карбида кремния и силицида молибдена: № 2021132723: заявл. 08.11.2021: опубл. 24.01.2023 / Каледин А.В., Шикунов С.Л., Шикунова И.А., Курлов В.Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН). – 10 с.: 3 ил. // Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2788686C1/ru?oq=RU+2788686> (дата обращения: 19.02.2026).

Замечания по диссертационной работе

- 1) Было бы полезно дать в автореферате и диссертации более подробное описание метода жидкофазного силицирования. Несмотря на то, что данная технология известна, детали конкретных установок и методик весьма существенны для диссертационной работы.
- 2) Недостаточно представлены конкретные применения разрабатываемых материалов в изделиях сложной формы (каких именно?)
- 3) Формирование силицидных слоев на металлических фольгах и проволоках в керамической матрице происходит по механизму реакционной диффузии, который достаточно подробно исследован. Следовало бы рассмотреть в диссертации существующие теоретические модели данного механизма применительно к формированию двухфазных силицидных слоев в рассматриваемых условиях.
- 4) Утверждение о создании многослойных материалов не находит достаточного подтверждения в представленных материалах. Представлены керамические образцы с одним металлическим слоем, причем расположение этого слоя в срединной плоскости не позволяет эффективно оценить его влияние на механические свойства. Было бы целесообразно получить образцы с несколькими слоями «металл/силицид», причем некоторые из этих слоев должны располагаться в области растягивающих напряжений. Аналогичное замечание можно сделать относительно армирования металлическими проволоками.
- 5) В тексте и на рисунках имеется небольшое количество опечаток (например, Рис. 2.5 – «Напряженгие»).

Отмеченные недостатки не ставят под сомнение научную новизну диссертационной работы и достоверность ее выводов.

Заключение

Диссертационная работа Каледина Алексея Владимировича «Керамоматричные композиционные материалы на основе карбида кремния, тугоплавких металлов и их силицидов», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния, является завершенной научно-квалификационной работой. Поставленные перед исследованием цели достигнуты, полученные результаты вносят значимый вклад в развитие

способов получения керамоматричных композиционных материалов на основе SiC.

Диссертационная работа соответствует требованиям к кандидатской диссертации, перечисленным в «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (в ред. от 25.01.2024 г.), а ее автор Каледин Алексей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Работа заслушана и обсуждена на секции Ученого совета ИСМАН «Материалообразующие процессы горения и взрыва» (протокол № 10 от 28 апреля 2026 г.). Отзыв составлен на основании доклада, анализа диссертации, автореферата и публикаций Каледина А.В.

Рецензент:

главный научный сотрудник лаборатории динамики микрогетерогенных процессов, д.ф.-м.н., профессор

Александр Сергеевич
Рогачев

Председатель секции Ученого совета ИСМАН, главный научный сотрудник лаборатории жидкофазных СВС-процессов и литых материалов ИСМАН, д.т.н., профессор

Владимир Исаакович
Юхвид

Подписи Рогачева А.С. и Юхвида В.И. удостоверяю
Ученый секретарь ИСМАН, к.т.н.

Е.В. Петров



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения
им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук (ИСМАН)
142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 8.
Тел.: 8 (49652) 46-376, Факс: 8 (49652) 46-222, E-mail: isman@ism.ac.ru