

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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 диссертации

Современные жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС) достигли своего температурного предела равного  $\sim 1200^{\circ}\text{C}$ . Дальнейшее легирование ЖНС, применение еще более сложной системы охлаждения не позволяет существенно повысить максимальную рабочую температуру деталей «горячего» тракта перспективных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). В связи с этим, повышение рабочей температуры наиболее теплонагруженных узлов и деталей турбины ГТД, камеры сгорания возможно за счет использования более высокотемпературных материалов.

Применение керамических композиционных материалов (ККМ) с карбидокремниевой матрицей, армированных непрерывными бескерновыми волокнами карбида кремния ( $\text{SiC}/\text{SiC}$ ) для изготовления наиболее теплонагруженных деталей и сборочных единиц ГТД позволяет повысить их рабочую температуру выше  $1200^{\circ}\text{C}$ . Важно подчеркнуть, что данные ККМ находят всё большее применение также в атомной энергетике, ракетной технике и т.д.

К сожалению, поставки высококачественных  $\text{SiC}$  волокон и материалов на их основе в Россию запрещены. В связи с этим, разработка керамических композиционных материалов на основе карбида кремния, армированных альтернативными непрерывными наполнителями, и внедрение энергоэффективных технологий изготовления изделий на их основе является чрезвычайно актуальной задачей.

**Целью представленной работы** являлось получение керамоматричных композитов на основе  $\text{SiC}$ , тугоплавких металлов и их силицидов, а также исследование их свойств.

В соответствии намеченной целью были сформулированы следующие **задачи:**

Разработать и запатентовать способ получения изотропной композиционной керамики на основе  $\text{SiC}$  и  $\text{MoSi}_2$  ( $\text{SiC-MoSi}_2$ ) методом жидкофазного силицирования пористых металлоуглеродных заготовок;

Разработать и запатентовать способ получения слоистой композиционной керамики на основе SiC и фольг из тугоплавких металлов Ti, Nb, Mo (Me-MeSi<sub>2</sub>-SiC);

Разработать и запатентовать способ однонаправленно-армированных керамоматричных композитов с проволоками из молибдена в качестве армирующих элементов (Mo-SiC);

Провести микроструктурные исследования, рентгенофазовый анализ и физико-механические испытания разработанных КМК;

Исследовать влияние высокотемпературной выдержки на структурный состав однонаправленно армированных КМК Mo-SiC;

Разработать методику проведения количественной оценки изменения геометрических параметров цилиндрических армирующих элементов в композитах Mo-SiC.

### **Структура и объем диссертационной работы**

Структура диссертации включает введение, пять глав, основные выводы и результаты, библиографический список. Общий объем работы – 153 страницы, содержащие 75 рисунков и 27 таблиц. Список цитируемой литературы включает 209 источников.

### **Анализ содержания работы и основных положений, выносимых на защиту**

**Введение** состоит из обоснования актуальности темы исследования, цели и задач работы, практической значимости, а также основных положений, выносимых на защиту.

В **первой главе** представлен литературный обзор, посвященный способам получения изделий из карбида кремния. Приводятся основные свойства различных видов керамик на основе карбида кремния, получаемых различными методами, проанализированы основные их преимущества и недостатки.

С целью повышения трещиностойкости и получения конструкционных керамических материалов и изделий на их основе, сохраняющих несущую способность в широком диапазоне температур, обсуждаются различные типы армирования ККМ.

Во **второй главе** рассмотрены особенности получения изотропных композиционных материалов на основе SiC и силицидов тугоплавких металлов методом жидкофазного силицирования. Приводится детальное описание технологического процесса изготовления керамического материала на основе карбида кремния с возможностью регулирования фазового состава в широком диапазоне значений основных его компонентов – SiC, C, Si, а также материалов на основе SiC и силицидов тугоплавких металлов состава

SiC-MeSi<sub>2</sub>. Подробно описана методическая часть работы, включающая расчёт состава исходной шихты для формирования углеродсодержащих пористых заготовок, этапы подготовки образцов для проведения исследований микроструктуры, определения фазового состава и физико-механических свойств. Было установлено, что добавление 10 масс. % молибдена положительно влияет на фазовый состав итоговой композиционной керамики с точки зрения минимизации содержания остаточного кремния и непрореагировавшего углерода, а также повышения предела прочности при изгибе (с (206,91÷249,07) МПа до (258,20÷275,30) МПа). Еще более высокое значение предела прочности как при изгибе (381,4 МПа), так и при сжатии (1739 МПа) было получено на дисперсно-упрочненном ККМ состава SiC-MeSi<sub>2</sub>, содержащим первичный SiC порошок с добавлением 10 масс. % молибдена.

В **третьей главе** приводится описание способа получения слоистых керамоматричных композиционных материалов (ККМ) и изготовление экспериментальных образцов для проведения исследований. В качестве армирующих слоев были применены фольги тугоплавких металлов (Mo, Nb, Ti) толщиной от 400 до 500 мкм. На способ получения слоистых композиционных материалов получен патент РФ № 2818920 «Высокотемпературный реакционносвязанный слоистый композит на основе SiC керамики, тугоплавкого металла и его силицидов и способ его получения». Автором установлено, что полученные экспериментальные образцы ККМ представлены керамической матрицей состава SiC ((50÷55) об. %) – C ((30÷35) об. %) – Si ((10÷15) об. %), армированные соответствующими слоями тугоплавких металлов, на которых в процессе проведения жидкофазного силицирования были сформированы соответствующие силицидные слои состава MeSi<sub>2</sub> (где Me – Mo, Nb, Ti) толщиной до 200 мкм. Было установлено, что придание керамическому материалу на основе карбида кремния слоистой структуры позволило значительно увеличить энергоёмкость процесса разрушения и добиться перехода от хрупкого характера разрушения, характерного для базовой SiC керамики, к квазипластичному характеру разрушения при содержании металлической фазы в количестве всего (13÷17) об%.

В **четвертой главе** приводится подробное описание способа получения непрерывно армированных керамоматричных композиционных материалов, результаты исследования микроструктуры и фазового состава экспериментальных образцов, а также результаты измерения прочностных свойств. Установлено, что при контактном взаимодействии расплава кремния с молибденовой проволокой на границе раздела образуется силицидный слой

сложного состава  $\text{MoSi}_2$  -  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$  толщиной около 100 мкм. Испытания экспериментальных образцов при 20°C, содержащих Мо проволоку толщиной 1,0, 1,5 и 2,0 мм, показали, что с увеличением диаметра проволоки происходит повышение предела прочности образцов не менее чем на 16%. Все образцы как при 20°C, так и при 1500°C продемонстрировали квазипластичный характер разрушения при испытании на 3-х точечный изгиб.

В пятой главе приводятся результаты изучения влияния высокотемпературной выдержки образцов из ККМ, армированных Мо проволокой диаметра  $\phi 1,0$  мм, на кинетику роста силицидных слоев состава  $\text{MoSi}_2$  и  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$ . Было установлено, что при температуре проведения высокотемпературной обработки равной 1600°C и с увеличением времени выдержки до 9 ч наблюдается утолщение слоя  $\text{MoSi}_2$  всего на (10-12) %, при этом увеличение толщины образовавшегося слоя состава  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$  увеличилось более чем на один порядок и составило величину равную  $(150,27 \pm 21,51)$  мкм. С целью определения количественной оценки изменения толщины силицидного слоя с увеличением времени выдержки было проведено численное моделирование процесса нагрева графитового тигля и образцов в трехмерной постановке с применением программного комплекса Ansys Mechanical (ANSYS, Inc). Было установлено, что разработанная методика вполне пригодна для проведения первичной оценки изменения толщины силицидного слоя состава  $\text{Mo}_5\text{Si}_3$  и диаметра остаточного Мо, о чем свидетельствуют невысокие значения ошибок, полученные сравнением экспериментальных и расчетных значений.

В конце диссертации представлены основные результаты и выводы по работе, приведен список условных сокращений, а также список использованной литературы.

На защиту автор **выносит следующие положения:**

1. Способ получения изотропных композиционных материалов SiC- $\text{MoSi}_2$ .
2. Способ получения слоистых композиционных материалов Me- $\text{MeSi}_2$ -SiC на основе SiC, тугоплавких металлов и их силицидов.
3. Способ получения непрерывно армированных керамоматричных композиционных материалов Mo-SiC на основе SiC и молибденовой проволоки.
4. Расчётно-экспериментальная методика количественной оценки изменения геометрических параметров цилиндрических армирующих элементов композитов Mo-SiC в процессе высокотемпературной выдержки.

## **Научная новизна и практическая значимость полученных результатов**

К наиболее важным **научным результатам**, а также практически значимым достижениям диссертационной работы следует отнести следующее:

1. Впервые разработан способ получения изотропной композиционной керамики на основе SiC и MoSi<sub>2</sub> путём жидкофазного силицирования пористых металлоуглеродных заготовок со значением объемной доли свободного кремния менее 3 об. %;

2. Впервые разработан способ получения слоистой композиционной керамики Me-MeSi<sub>2</sub>-SiC на основе фольг тугоплавких металлов (где Me=Mo, Nb, Ti) путем жидкофазного силицирования пористых металлоуглеродных заготовок;

3. Впервые разработан способ получения однонаправленно армированной композиционной керамики Mo-SiC с армирующими элементами в виде проволоки из молибдена путем жидкофазного силицирования пористых металлоуглеродных заготовок;

4. Исследовано влияние высокотемпературной выдержки при 1600°C на структурные изменения системы Mo-Mo<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>-MoSi<sub>2</sub> для армирующих элементов цилиндрической формы;

5. Предложена методика количественной оценки изменения толщины силицидного слоя на поверхности цилиндрических армирующих элементов с применением численного моделирования процессов теплопереноса в структуре композитов.

### **Апробация результатов диссертационной работы и публикации**

Основные результаты выполненного исследования были лично доложены автором на нескольких всероссийских и международных конференциях и вызвали практический интерес среди специалистов, принимающих участие в разработке и применении изделий высокотемпературного назначения. Самостоятельный вклад Каледина А. В. при постановке и выполнении экспериментов, обработке полученных данных, интерпретации результатов не вызывает сомнений. По материалам исследования были опубликованы 4 печатные работы, включенные в перечень ВАК РФ, получены 4 патента РФ:

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность представленных в диссертационной работе Каледина А. В. результатов и сделанных выводов обеспечивается применением современного исследовательского и технологического оборудования, например, сканирующего электронного микроскопа Zeiss

Supra 50VP, универсальной машины «УТС 111» модификации «УТС 111.2-50-22» и др. Полученные данные представляют **научный и практический интерес** для специалистов академических отраслевых предприятий, Госкорпораций, занимающихся разработкой высокотемпературных композиционных материалов, их внедрением в производство – ИМЕТ РАН, НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, АО «Композит», ОДК, РОСАТОМ и др.

#### **Замечания и рекомендации по диссертационной работе**

1. Не приводится объяснение, с чем связано повышение предела прочности при изгибе образцов из ККМ при замещении  $Si_{св}$  на  $MoSi_2$ ;

2. В работе отсутствует объяснение выявленной автором особенности, связанной с различием фазовых составов образовавшихся межфазных слоев при взаимодействии расплава кремния с Mo фольгой ( $MeSi_2$ , стр. 84) и Mo проволокой ( $Mo_5Si_3$ - $MoSi_2$ , стр. 94). С чем это связано?

3. Чем автор объясняет отсутствие карбида молибдена в составе ККМ после пропитки расплавом Si пористых углеродных образцов, содержащих 10 масс. % порошка Mo?

4. В Главе 5 указаны данные только для 9 часов выдержки образцов ККМ при  $1600^\circ C$  (диаметр остаточного Mo, толщина слоя  $Mo_5Si_3$ ) и не приводится соответствующее значение для  $t > 20$  ч. С практической точки зрения было бы интересным определить предельное время выдержки, при котором Mo полностью перейдет в неметаллическую фазу и в составе ККМ будет отсутствовать металлический армирующий наполнитель.

Данные замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы. Диссертация оформлена надлежащим образом, написана в научном стиле, материал изложен последовательно, логично и аргументированно.

#### **Заключение**

Диссертационная работа «Керамоматричные композиционные материалы на основе карбида кремния, тугоплавких металлов и их силицидов» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук согласно п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор, Каледин Алексей Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Автореферат полностью отражает содержание представленной диссертации.

**Официальный оппонент:**

Сорокин Олег Юрьевич, кандидат технических наук по специальности 05.16.06 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы», начальник сектора лаборатории «Керамические композиционные материалы, антиокислительные покрытия и жаростойкие эмали» НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ

14 мая 2026 г.

Сорокин Олег Юрьевич

Согласен на обработку персональных данных

14 мая 2026 г.

Сорокин Олег Юрьевич

Подпись Сорокина О.Ю. удостоверяю:

Зам. председателя ученого совета  
НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ  
кандидат технических наук, доцент



Свириденко Данила Сергеевич

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ),  
105005, Россия, Москва, ул. Радио, д. 17,  
<http://www.viam.ru>,  
Телефон: 8(499)261-86-77  
Адрес электронной почты: [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)