

## Отзыв

на автореферат диссертационной работы Фроловой Марианны Геннадьевны на тему: «**Композиционная керамика на основе карбида кремния, армированная волокнами карбида кремния**», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.11 – технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов

Карбид кремния отличается от других бескислородных соединений доступностью, низкой плотностью, хорошими физико-механическими и химическими свойствами, что позволяет использовать материалы на основе карбида кремния в самых разнообразных областях современной техники. Изделия из карбида кремния изготавливают разными методами: рекристаллизационным, реакционным спеканием, горячим прессованием и др. Прекрасные свойства изделий из SiC позволяют применять его в качестве деталей двигателей внутреннего сгорания, в газотурбинных двигателях, в качестве режущего инструмента, керамических подшипников, рабочих узлов насосов, форсунок и горелок, оснастки для обжига керамических изделий, химически стойких деталей трубопроводов, теплообменников, работающих в агрессивной среде, нагревателей различных размеров, работающих при температурах 1400-1500 °С в воздушной атмосфере, также изделия из плотного карбида кремния используются в атомной энергетике, благодаря его высокой стойкости к радиационным излучениям.

Для спекания изделий до плотного состояния и обеспечения устойчивости к окислению при температурах до 1800-2000 °С в материал вводят оксидные компоненты в количестве 5-20 мас. %, которыми являются порошки, например, алюмоиттриевого граната, магнезиальной шпинели и др. Сочетание новых подходов к конструированию составов и технологии изготовления изделий на основе SiC позволило существенно расширить области их применения.

Присутствие в керамике армирующего компонента в виде волокон, тканей и нитевидных кристаллов позволяет перейти к новому виду материала – керамические композиционные материалы. Огромным преимуществом которых является отличающийся

от монолитных материалов механизм разрушения при воздействии нагрузок. Включение армирующих компонентов в материал повышает уровень прочностных характеристик и уменьшает хрупкость керамики.

Волокна карбида кремния обладают высоким уровнем свойств, который позволяет использовать их для создания изделий, способных работать в условиях агрессивных сред. Производство волокон карбида кремния является сложным, многостадийным и ресурсозатратным процессом. На территории РФ в промышленных масштабах производство волокон карбида кремния отсутствует.

Работа представляется завершённым циклом исследований – от сырья до получения конечных опытных образцов и оценки их свойств. В связи с этим полученные результаты представляют значительный интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения.

**Целью работы** является разработка керамических композитов на основе карбида кремния, армированных волокнами  $\text{SiC}_f$ , полученных силицированием углеродной ткани парами  $\text{SiO}$ , с использованием метода горячего прессования и исследование их механических и физико-химических свойств.

#### **Степень обоснованности научных положений**

1. Предложен и экспериментально реализован способ получения композита  $\text{SiC-SiC}_f\text{-YAG}$  ( $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ ). Установлена зависимость прочности при изгибе от содержания армирующего компонента;

2. Изучены механические и физико-химические характеристики волокон  $\text{SiC}_f$ , полученных силицированием углеродной ткани парами  $\text{SiO}$ ;

3. Установлено, что взаимодействие  $\text{SiC}$  со спекающими добавками  $\text{YAG}$  и  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  характеризуется образованием жидкой фазы сложного состава, влияющей на механические характеристики композита;

4. Установлены зависимости физико-химических и механических свойств неармированных образцов  $\text{SiC}$ -керамики от дисперсности и морфологии частиц порошков исходного карбида кремния, полученного разными методами («Saint Gobain», СВС, М5 ВАЗ) и содержания спекающих добавок.

#### **Значимость полученных результатов для науки**

Всесторонний комплекс исследований, проведённых в диссертационной работе, позволяет сделать полную оценку качества полученных армированных материалов, а также

научного исследования в целом и прийти к выводу, что объем исследований в диссертационной работе Фроловой М.Г. подкреплен большим количеством научных публикаций по материалам работы и имеющейся возможностью практического применения разработанной армированной керамики в качестве конструкционных высокопрочных материалов.

#### **Практическая значимость.**

Работа, несомненно, имеет прикладной характер и высокое практическое значение для производства высокоплотных керамических материалов на основе карбида кремния, в частности, решены следующие важные задачи:

- разработан оригинальный способ получения керамики на основе карбида кремния, армированной волокнами карбида кремния, полученными силицированием углеродной ткани парами SiO, методом горячего прессования;

- установлено, что наиболее высокий уровень механических характеристик композиционной керамики получен методом горячего прессования из СВС порошков карбида кремния с добавкой 10 мас. % YAG и 10 мас. % SiC<sub>f</sub>: прочность при изгибе 633±33 МПа, плотность 3,2±0,01 г/см<sup>3</sup>. Данная керамика рекомендуется для изготовления деталей, работающих в эксплуатационных условиях (широкий интервал температур, агрессивная среда, механические и ударные нагрузки);

- установлены технологические параметры получения керамики на основе карбида кремния, армированной волокнами SiC<sub>f</sub>.

По результатам работы получены патенты RU 2718682 С2 «Способ изготовления керамики на основе карбида кремния, армированного волокнами карбида кремния» приоритет 12.09.2018 и RU 2744543 «Способ получения керамического композиционного материала на основе карбида кремния, армированного волокнами карбида кремния» приоритет 15.09.2020, подана заявка на патент «Способ получения композиционного материала с керамической матрицей и послойной укладкой армирующего компонента в виде ткани карбида кремния» (регистрационный №2020134050).

Результаты диссертационного исследования частично получены при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-08-01460 и гранта УМНИК № 14009ГУ/2019.

#### **Апробация работы, структура и объем диссертации**

По теме диссертации опубликовано 27 печатных работ, в том числе 9 статей в рецензируемых научных журналах, включенных в международные базы данных, 16 докладов на Международных и Российских конференциях и 2 патента РФ.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа представлена на 140 страницах машинописного текста, иллюстрирована 70 рисунками и 8 таблицами. Список цитируемой литературы содержит 143 наименования.

Рассматриваемая диссертация является законченным исследованием, направленным на решение важной и актуальной проблемы. Она выполнена на высоком научном уровне, с использованием оригинальных подходов и представляет серьезный вклад в создание физико-химических основ проектирования свойств и разработку технологии плотных армированных материалов на основе карбида кремния, практическая реализация которого позволит получить новый конструкционный армированный керамический материал с высоким уровнем механических характеристик.

Автореферат написан хорошим научным языком. Обращает на себя внимание информативность представленных рисунков и четкость обсуждения полученных результатов. Диссертация является цельным и завершенным исследованием на актуальную тему, отличающимся новизной, имеющим научную и практическую значимость. Результаты диссертации достоверны, а заключение и рекомендации – научно обоснованы.

### **По содержанию работы возникли следующие замечания и вопросы:**

1. На странице 7 автореферата сказано, что порошок карбида кремния фирмы «Saint Gobain» размером 1 мкм представлен в виде гранул (рис. 1а). Данный порошок точно не гранулированный, поскольку получить гранулы 1 мкм крайне сложно. Обычно в фирме «Saint Gobain» выпускают гранулированные шихтовые порошки размером 200-300 мкм;

2. На странице 7 и 8 автореферата сказано, что порошок, полученный СВС, имеет размер 100-400 нм, но судя по картинке (рис. 1в) размер частиц порошка 2-6 мкм;

3. Автор не объясняет почему на рис. 18 диаметр волокна менее 2,5 мкм, хотя исходные волокна имели диаметр 5-7 мкм?

4) Главной характеристикой конструкционных материалов является прочность и критический коэффициент интенсивности напряжений, которые автор измеряла в работе,

но было бы более информативно предоставить весь комплекс физико-механических характеристик армированных и не армированных материалов (плотность, модуль упругости, твердость);

#### **Заключение и выводы**

Несмотря на возникшие замечания, большинство из которых носит характер пожеланий, они не снижают высокого научного уровня и не влияют на общую оценку выполненных исследований. Диссертация хорошо структурирована, грамотно оформлена и **полностью соответствует паспорту заявленной специальности 05.17.11.**

Считаю, что рассматриваемая диссертационная работа представляет собой законченное исследование, свидетельствующее о большом вкладе соискателя в развитие направления науки о силикатных и тугоплавких неметаллических материалах, и соответствует требованиям пп. 9-14 «Положение о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, **Фролова Марианна Геннадьевна**, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.11 – технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

Заведующий лаборатории исследования наноструктур  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Ордена Трудового Красного Знамени Института химии силикатов  
им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук, доктор химических наук,  
Академик РАН, профессор по специальности 02.00.04 - физическая химия

Шевченко Владимир Ярославович

Адрес ИХС РАН: 199034, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 2  
Тел. отд. кадров ИХС РАН: 8(812) 328-85-78  
E-mail: shevchenko@isc.nw.ru

Подпись Шевченко В.Я. заверяю  
заместитель директора  
по научной работе, к.х.н.



Н.Г. Тюрнина