

Научная статья

УДК 661.665.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-53-62

## ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОТЕРМОСТОЙКОГО МАЛОУСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ХИМИЧЕСКИ УПРОЧНЕННОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

*В.В. Викулин<sup>1</sup>, С.С. Гвоздев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Приводятся особенности и закономерности технологии получения высокотермостойкого малоусадочного карбида кремния в результате формирования в пористой структуре материала зон с различной теплопроводностью, а также за счет повышения прочности, устойчивости к окислению при температурах до 1600 °С и предотвращения восстановления SiO<sub>2</sub> карбидом кремния при высоких температурах.

Приведены зависимости плотности, линейной усадки и количества связки при формировании предварительно спеченных образцов керамики от удельной поверхности порошков карбида кремния. Показано влияние плотности предварительно спеченной керамики на прочность образцов при температурах 20, 1400 и 1500 °С. Приведены данные по влиянию пропитки кремнийорганическим соединением и высокотемпературной обработки образцов керамики в среде азота и на воздухе на повышение прочностных характеристик и стойкости керамики к окислению.

**Ключевые слова:** карбид кремния, спекание, кремнийорганическое соединение, азотирование, термодинамический расчет, газовый и вибрационный стенды

**Для цитирования:** Викулин В.В., Гвоздев С.С. Особенности получения высокотермостойкого малоусадочного материала на основе химически упрочненного карбида кремния // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-53-62.

Scientific article

## FEATURES OF OBTAINING A HIGHLY HEAT-RESISTANT LOW SHRINKAGE MATERIAL BASED ON CHEMICALLY STRENGTHENED SILICON CARBIDE

*V.V. Vikulin<sup>1</sup>, S.S. Gvozdev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The article presents the features and regularities of the technology of obtaining highly heat-resistant low shrinkage silicon carbide by forming zones with different thermal conductivity in the porous structure of the material, increasing the strength and resistance to oxidation at temperatures up to 1600 °C, preventing the reduction of SiO<sub>2</sub> by silicon carbide at high temperatures.

The dependences of density, linear shrinkage and amount of binder during of pre-sintered ceramic samples on the specific surface of silicon carbide powders are presented. The effect of pre-sintered ceramic density on the strength of samples at temperatures of 20, 1400 and 1500 °C is demonstrated. Data are presented on the effect of impregnation of silicon carbide

*with a silicon organic compound and high-temperature treatment of ceramic samples in a nitrogen environment and in air on increasing the strength characteristics and resistance of ceramics to oxidation.*

**Keywords:** *silicon carbide, sintering, silicon organic compound, nitriding, thermodynamic calculation, gas and vibration stands*

**For citation:** Vikulin V.V., Gvozdev S.S. Features of obtaining a highly heat-resistant low shrinkage material based on chemically strengthened silicon carbide. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-53-62.

### Введение

Успехи СССР в области разработки конструкционных и функциональных керамических материалов для газотурбинных и поршневых двигателей в конце 70-х – середине 80-х гг. прошлого столетия были неоспоримы и опережали европейские разработки.

Ученые, инженеры, конструкторы многих предприятий Советского Союза принимали активное участие в реализации разработок керамических материалов для различных двигателей. Были достигнуты успехи по разработке материалов на основе реакционносвязанного и самоармированного  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , сохраняющих прочность до 1400 °С на воздухе, а также материалов с повышенными термостойкостью и истираемостью или пониженной теплопроводностью, применительно к различным элементам и узлам газотурбинных и поршневых двигателей, подтвердивших работоспособность при температурах 1100–1400 °С в качестве элементов жаровой трубы камеры сгорания, сопловых и рабочих лопаток, истираемых надроторных уплотнений и других элементов [1, 2]. В меньшей степени уделялось внимание получению высокопрочной керамики на основе спеченных нитрида и карбида кремния. В то время решение многих задач сталкивалось с проблемой хрупкости керамических материалов, трудностью придания деталям сложной геометрической формы с помощью технологий горячего прессования и горячего изостатического прессования, а также отсутствием технологий механической обработки керамики, обладающей высокой твердостью. К середине 90-х гг. XX в. работы в направлении широкого применения керамики в адиабатных поршневых и газотурбинных двигателях были практически остановлены.

В настоящее время интерес российских конструкторов к применению керамических и керамоматричных композиционных материалов в двигателестроении возобновляется.

Спеченный карбид кремния имеет некоторые преимущества по сравнению с нитридом кремния из-за большей устойчивости при температурах до 1600 °С, но уступает ему по термостойкости из-за более высокого температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), больших усадок и высокой твердости, затрудняющей механическую обработку сложнопрофильных изделий. Плотная керамика на основе карбида кремния, полученная спеканием тонкодисперсных порошков карбида кремния или горячим прессованием с активаторами спекания при температурах до 1800–2000 °С, обладает высокой твердостью, абразивостойкостью и применяется в настоящее время как баллистический материал с подложкой из сверхвысокомолекулярного полиэтилена для защиты личного состава и техники [3]. Такие изделия из карбида кремния не могут эксплуатироваться при температурах 1500–1600 °С в условиях высоких темпов нагрева в различных деталях двигателей и других высокотемпературных устройствах, при которых в изделиях, особенно толстостенных, создаются высокие напряжения из-за больших градиентов температур.

Существуют технологии изготовления пористого или плотного карбида кремния, содержащего тугоплавкие добавки, такие как силициды молибдена, вольфрама, тантала, ниобия, германия, рения, а также добавки бора, графита, кремния, диборида циркония, алмаза и других элементов [4–8]. Несмотря на то что некоторые из них могут сохранять прочность до температуры 1500 °С и жаростойкость – до 2000 °С, такие материалы предназначены для использования в качестве абразивостойких инструментов при резании, бурении, обработке давлением, в качестве антифрикционных деталей машин, сопловых вкладышей, тиглей, фильтров или в условиях повышенных температур при медленных темпах нагрева. Некоторые из них начинают терять прочность при температуре 1300 °С. Такие материалы не могут применяться в качестве термостойких, в том числе из-за неустойчивости в окислительных средах, продуктах сгорания топлива и их большой стоимости за счет применяемых добавок. Из таких материалов трудно получать сложнопрофильные изделия без механической обработки.

Одним из материалов, сведения о технологии изготовления которого в предыдущих публикациях были недостаточно представлены, является высокотермостойкий малоусадочный карбид кремния. Имеются научно-технические публикации о некоторых свойствах данного материала без подробного объяснения технологии и результатов испытаний как материала, так и изделий [9–13].

В работе применялись: порошок зеленый карбида кремния, установка термопластичного литья под давлением, печи с электрическими и с графитовыми нагревателями. Прочностные испытания образцов при изгибе при температурах до 1400 °С на воздухе и вибрационные испытания проводились на нестандартном оборудовании [14].

### Материалы и методы

В качестве исходного сырья при разработке материала использовали зеленый порошок карбида кремния зернистостью 20 мкм, содержащий 99,2 % карбида кремния. Дополнительный помол порошка проводили шарами из карбида кремния в шаровой мельнице, футерованной пластинами карбида кремния или оксида алюминия, до удельной поверхности 8000–11000 м<sup>2</sup>/г. При формовании образцов и заготовок изделий применяли термопластичную связку на основе воска и парафина. Формование осуществляли на нестандартном оборудовании при температуре 60 °С под давлением. После удаления связки из глинозема, выполняющего функцию адсорбента, образцы спекали в печи с графитовыми нагревателями при температурах до 1800–2000 °С в среде азота. Плотность образцов керамики определяли по ГОСТ 2409–85. Предел прочности при изгибе определяли в условиях кратковременного нагружения при комнатной температуре и при температурах 1400 и 1500 °С на нестандартном оборудовании. Коэффициент интенсивности напряжения  $K_{1c}$  определяли по нестандартной методике «изгиб с надрезом». Термообработку образцов осуществляли в печах с металлическими и графитовыми нагревателями.

### Результаты и обсуждение

Методом термопластичного литья под давлением можно получать детали сложного профиля, когда в зависимости от дисперсности порошка и температуры спекания линейная усадка керамики составляла 0,5–3,0 %, и изделия не требовали механической обработки, поскольку усадка при спекании была постоянной, а поверхность задавалась металлической формой для литья. При удалении связки из глинозема заготовки сохраняли геометрическую форму и целостность.

На рис. 1 представлена зависимость линейной усадки, плотности и количества связки от удельной поверхности порошка предварительно спеченного карбида кремния.

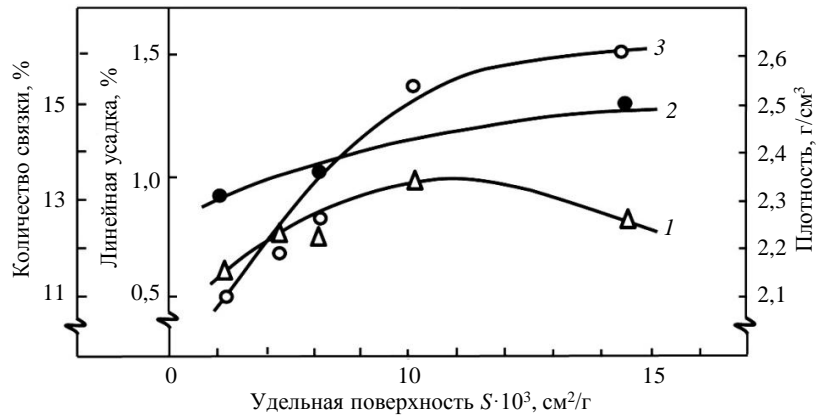


Рис. 1. Влияние удельной поверхности порошка карбида кремния на количество связи и свойства предварительно спеченной керамики: 1 – плотность; 2 – линейная усадка; 3 – количество связи

На рис. 2 показано влияние плотности предварительно спеченного карбида кремния на пористость и прочность керамики.

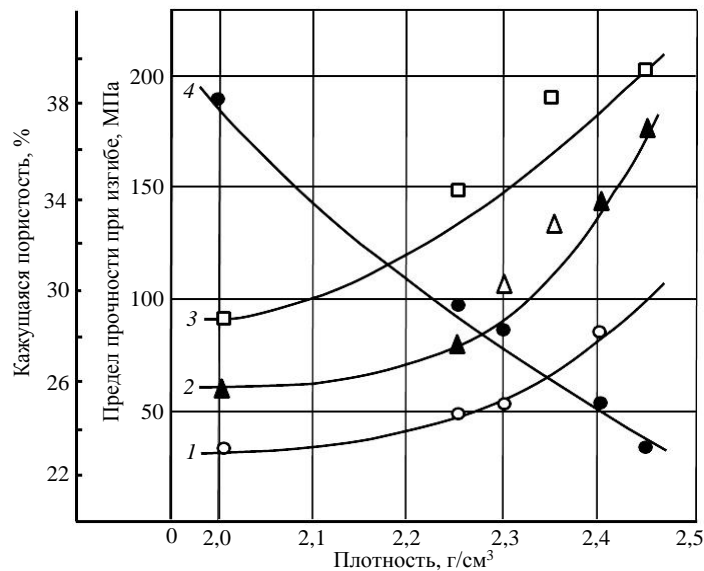


Рис. 2. Зависимость пористости (4) и прочности при температурах 1500 (1), 20 (2) и 1400 °С (3) предварительно спеченного карбида кремния от плотности

Спекание керамики происходило за счет самой тонкой фракции карбида кремния и незначительных технологических примесей оксида алюминия.

При температуре испытаний 1400 °С прочность образцов при изгибе превышает их прочность при комнатной температуре за счет достаточно высокой вязкости межзеренной фазы, ее пластичности, залечивания дефектов зерен, возможных микротрещин, сглаживания поверхностей пор и релаксации напряжений.

Для повышения прочности и стойкости к окислению предварительно спеченные образцы карбида кремния пропитывали тетраэтиловым эфиром ортокремневой кислоты (этилсиликатом), особенность которого заключалась в том, что в процессе термообработки при температурах до 1350–1400 °С в атмосфере азота происходила его диффузия к поверхности керамики, диссоциация до  $\text{SiO}_2$  и образование  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в поверхностном слое карбида кремния при взаимодействии с азотом.

Предварительно проведенный термодинамический расчет (рис. 3) показал, что в присутствии карбида кремния и углерода при температурах до 1450 °С в азотсодержащей среде происходит восстановление  $\text{SiO}_2$  с образованием нитрида кремния.

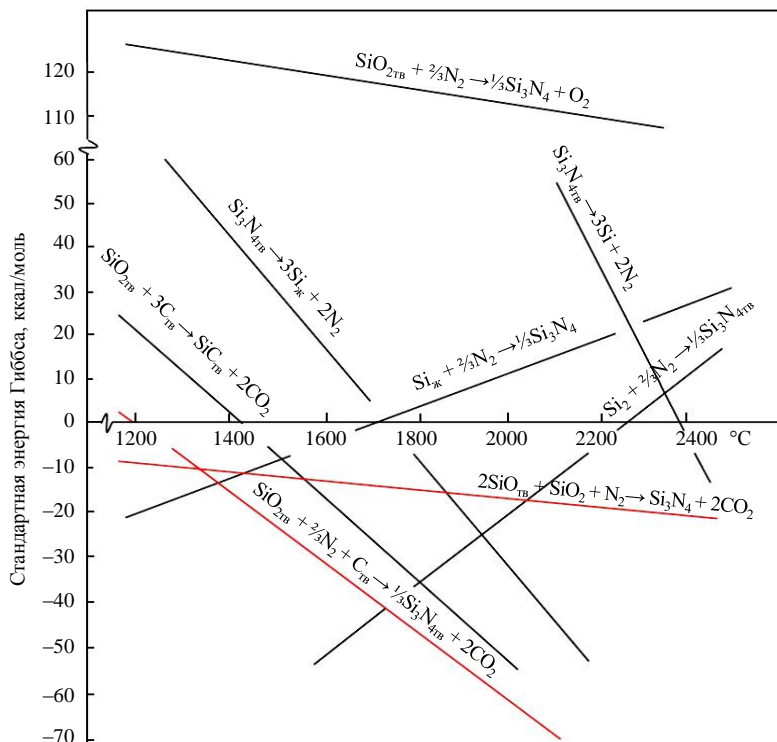


Рис. 3. Зависимость термодинамического потенциала в системе Si–O–C–N от температуры

Углерод, принимающий участие в реакции восстановления  $\text{SiO}_2$ , присутствует в виде примесей в порошке карбида кремния и в виде остатка после удаления пластифицирующей связки.

Для защиты от окисления образцы керамики дополнительно пропитывали этилсиликатом и проводили кратковременную термообработку при температурах до 1300 °С на воздухе, в результате чего в поверхностном слое карбида кремния присутствовали  $\alpha\text{-SiC}$ ,  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$  и оксинитрид кремния  $\text{Si}_2\text{ON}_2$ , наличие которых установлено рентгенофазовым анализом. После модификации теплопроводность пористого карбида кремния при температуре 50 °С снизилась с 10,0 до 7,4 Вт/(м·К).

На рис. 4 приведена микроструктура поверхности карбида кремния.

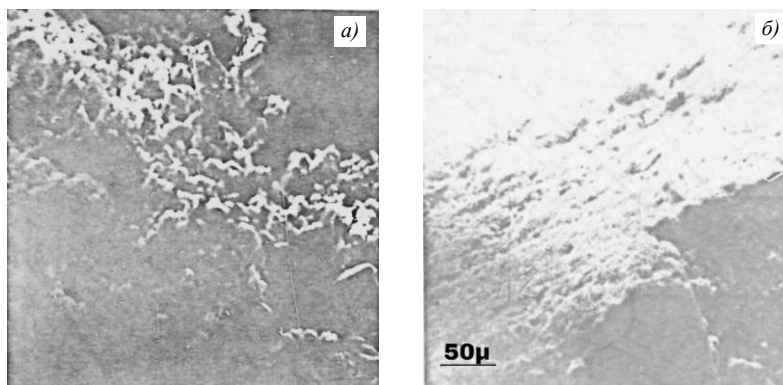


Рис. 4. Микроструктура поверхности керамики из карбида кремния после спекания (а) и химической модификации (б)

После проведения операций модифицирующей пропитки прочность керамики при изгибе при температуре 1400 °С на воздухе достигла 280 МПа при плотности 2,55 г/см<sup>3</sup>. Изменение массы макетных образцов керамики на воздухе при температуре 1300 °С в течение 50 ч составило 0,75 %.

На рис. 5 приведены зависимости изменения массы, плотности и прочности керамики после модифицирующих пропиток и термообработки от плотности предварительно спеченной керамики.

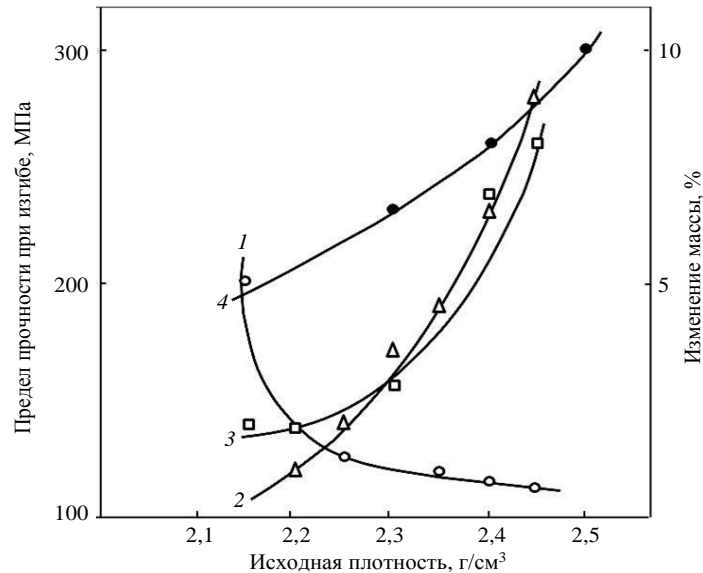


Рис. 5. Влияние плотности предварительно спеченного карбида кремния на свойства карбида кремния после его модификации: 1 – изменение массы; прочность при температурах 20 (2), 1500 (3) и 1400 °С (4)

Динамический модуль упругости керамики при температурах 20 и 1400 °С достигал 193 ГПа. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) в интервале температур 20–100 °С составлял  $2,8 \cdot 10^{-6}$  и  $4,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  в интервале температур 20–1500 °С.

Проведенные расчеты показали, что при температурах 1500–1600 °С карбид кремния восстанавливает SiO<sub>2</sub>, что может приводить к снижению защитных свойств керамики. В данном случае нитрид и оксинитрид кремния, диффузионно связанные с карбидом кремния, являются промежуточной прослойкой, разделяющей карбид кремния и SiO<sub>2</sub>, повышают вязкость стеклообразной пленки и препятствуют ее восстановлению и удалению с поверхности.

Предпринимались попытки защитить карбид кремния от окисления путем создания на поверхности керамики промежуточного слоя, который разделяет карбид кремния и SiO<sub>2</sub> и связывает диоксид кремния, появляющийся в результате диффузии кислорода через покрытие и окисляющий карбид кремния. В другом случае нитрид кремния и SiO<sub>2</sub> наносили на поверхность пористого карбида кремния с последующим спеканием. Данный материал предназначен для изготовления тиглей для высокотемпературной обработки стекла, хлор- и фосфорсодержащих соединений. Однако результаты испытаний обоих материалов при температурах от 1260 до 1380–1500 °С только косвенно подтверждают стойкость материалов к окислению [15, 16].

В другом патенте предлагается защищать карбид кремния травлением поверхности в щелочах и кислородсодержащих солях при температурах >400 °С или газообразным хлором при 800 °С с последующим нанесением на поверхность алюминия. Такой карбид кремния предназначен только для применения в полупроводниковой технике [17].

Керамические втулки топливных форсунок из разработанного материала (рис. 6) показали высокую работоспособность в условиях резких термических нагрузений, выдержав без разрушения 400 циклов нагрева и охлаждения топливом в секции камеры сгорания и на газотурбинном двигателе в газовых потоках с температурами 1100 и 1400 °С.

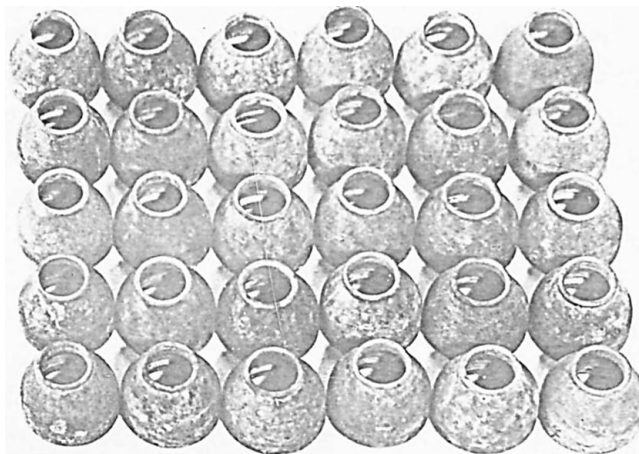


Рис. 6. Керамические втулки из карбида кремния для топливных форсунок

Десять втулок выдержали по 5–10 циклов нагрева в течение 30 с и охлаждения в течение 20 с на газодинамическом стенде, создающем на поверхности материала температуры 1550–1750 и 1220–1320 °С в разных зонах детали.

Крупногабаритные макетные образцы прошли термоциклические испытания на газодинамическом стенде с температурой в газовом потоке 1620 °С и охлаждением до комнатной температуры.

Высокая стойкость к термическому удару полученного материала может быть связана с его остаточной пористостью 20–15 % при плотности 2,4–2,7 г/см<sup>3</sup>, высоким значением трещиностойкости  $K_{Ic} = 2,1–4,0$  МПа√м при комнатной температуре и  $K_{Ic} = 3,1–4,1$  МПа√м при температуре 1200 °С, а также с меньшей теплопроводностью поверхностного слоя керамики по сравнению с внутренним объемом материала, за счет чего образец может нагреваться равномерно, создавая однородное температурное поле, не приводящее к напряженно-деформированному состоянию, которое дополнительно может нивелироваться при создании сжимающих поверхностных напряжений.

Еще одной уникальной особенностью разработанного материала оказалась чрезвычайно высокая устойчивость тонкостенной втулки, установленной с помощью цангового крепления в составе форсунки, выдержавшей без разрушения на вибрационном стенде суммарно  $15 \cdot 10^6$  циклов при нагрузках от 150 до 400 г, чему трудно найти объяснение в поведении хрупкого керамического материала.

Разработанная технология интересна еще и тем, что, применяя ее, можно создать высокотемпературный композиционный материал систем SiC–SiC и SiC–C<sub>f</sub>. В первом случае в пористой матрице карбида кремния создается вторичный карбид кремния путем пропитки углеродсодержащим мономером и последующим силицированием образца в газовой фазе в присутствии нитрида кремния при температурах до 1500–1850 °С. В качестве пропитки используют фенолформальдегидную смолу, имеющую максимальный выход по углероду при термической деструкции, или роливсан МВ-1, имеющий меньший выход, но обладающий низкой вязкостью, хорошей смачиваемостью и способностью пропитывать керамику с минимальной пористостью. Далее, после

нескольких циклов модификации и защиты от окисления, плотность керамики увеличилась с 2,3 до 2,7 г/см<sup>3</sup>, прочность при изгибе – с 64 до 348 МПа, изменение массы исходного образца при окислении при температуре 1300 °С на воздухе в течение 50 ч составило от 6 до 0,55 % у модифицированного образца [18].

Интересным оказался эффект пропитки предварительно спеченного образца карбида кремния акрилонитрилом, его полимеризации и термообработки, в процессе которых в порах керамики образовывались частицы полиакрилонитрила, переходящие в молекулы углерода удлиненной формы, как это происходит в случае получения полиакрилонитрильного углеродного волокна. При обработке модифицированных полиакрилонитрилом образцов в присутствии порошка нитрида кремния происходит образование усов карбида кремния как в объеме образца, так и верхней части тигля над засыпкой. Оптимизация этого процесса позволила бы получить образцы карбида кремния с более высокими механическими характеристиками.

Во втором случае в качестве исходного углеродсодержащего материала взят углепластик из полиакрилонитрильного углеродного волокна на эпоксидном связующем, в котором в результате деструкции образовался дисперсный углерод. Силицирование через газовую фазу в присутствии порошка нитрида кремния приводило к образованию матрицы карбида кремния, армированной углеродным волокном. Защита от окисления осуществлялась так же, как и в предыдущих случаях. Прочность образца при изгибе составляла 150–200 МПа, а значение  $K_{Ic}$  достигло 10 МПа $\sqrt{м}$ , что в ~2 раза превышало значение трещиностойкости плотной керамики на основе Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Образец материала SiC–C<sub>f</sub>, защищенный от окисления, прошел без изменений испытания на воздухе при температуре 1300 °С.

Недостаточная прочность композиционного материала при изгибе, очевидно, обусловлена тем, что даже при «мягком» силицировании нарушалась поверхностная целостность углеродного волокна. В этом случае при разработке новых композиционных материалов системы SiC–C<sub>f</sub> целесообразно применять углеродные волокна, предварительно защищенные известными способами с применением карбида кремния [19]. Такой композиционный материал на основе углеродных волокон с керамической матрицей мог бы решить проблему хрупкости высокотемпературных керамических материалов при эксплуатации в силовых установках при температурах 1400–1500 °С.

### **Заключения**

Благодаря сочетанию нескольких технологических подходов разработан высокотермостойкий малоусадочный материал на основе карбида кремния, из которого можно изготавливать детали сложной формы без механической обработки или с небольшой доработкой любым инструментом после первоначального спекания, работоспособные при температурах до 1400–1600 °С в окислительной среде и в продуктах сгорания топлива. Материал может быть применен в горячей зоне газотурбинного двигателя в качестве различных форсунок, горелок и других изделий в течение длительного времени или кратковременно при более высоких температурах.

Разработанная технология может успешно применяться при разработке композиционных материалов с керамической матрицей из карбида кремния, армированных углеродными волокнами.

### **Список источников**

1. Способ получения изделий на основе нитрида кремния: пат. 2239613 Рос. Федерация; заявл. 02.10.03; опубл. 11.10.04.
2. Vikulin V. Production of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Based Articles and Their Application in Aerospace Industry // Advances in Science and Technology. 2006. Vol. 45. P. 1751–1758.

3. Бхатнагара А. Мир материалов. Легкие баллистические материалы. М.: Техносфера, 2000. 392 с.
4. Molded porous ceramic article containing SiC and proses for the production there of: pat. 7648932B2 US; appl. 07.05.06; publ. 19.01.10.
5. Method for producing an abrasive compact: pat. 2176191 B1 EP; appl. 23.07.08; publ. 21.04.10.
6. Каблов Е.Н. Инновационные работы ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 1018577/ 2071-9140-2015-0-1-3-33.
7. Керамический окислительно стойкий композиционный материал и изделия из него: пат. 2560046 С1 Рос. Федерация; заявл. 10.07.14; опубл. 20.08.15.
8. Керамический композиционный материал и изделия, выполненные из него: пат. 2700428 С1 Рос. Федерация; заявл. 17.09.17; опубл. 18.07.18.
9. Термостойкий малоусадочный материал на основе карбида кремния: а.с. 197832 СССР; заявл. 19.08.81; опубл. 17.09.82.
10. Vikulin V., Leshuk T. Material based chemically strengthened silicon carbide // Refractories and Industrial Ceramics. 1992. Vol. 32. No. 9-10. P. 510–515.
11. Викулин В., Лешук Т. Материалы на основе химически упрочненного карбида кремния // Огнеупоры и техническая керамика. 1991. № 10. С. 8–12.
12. Способ обработки изделий из керамических материалов на основе карбида кремния и/или углерода: пат. 2276661 Рос. Федерация; заявл. 28.07.04; опубл. 20.05.06.
13. Vikulin V., Romashin A., Leshuk T. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Si composite ceramics and chemically toughened SiC for engine components. Ceramics in Energy Applications // 2<sup>nd</sup> International conference proceedings. London, 1994. P. 21–32.
14. Викулин В., Костина Л., Лешук Т., Штарев Г. Изделия из малоусадочного карбида кремния // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов. М.: ВИМИ, 1988. С. 33–34.
15. Суворов С., Чайкун Е., Гусаров В. Многослойные материалы на основе карбида кремния, стойкие к окислению // Оборудование, материалы, процессы. М.: ВИМИ, 1989. Вып. 3. С. 29–30.
16. Protective siliconoxinitride coating for porous refractories: pat. 4187344A US; appl. 27.09.78; publ. 05.02.80.
17. Способ защиты поверхности карбида кремния при высокотемпературном травлении: а.с. 270080 СССР; заявл. 05.03.74; опубл. 12.05.75.
18. Материалы на основе малоусадочного карбида кремния: а.с. 235082 СССР; заявл. 27.02.84; опубл. 24.03.85.
19. Doorbar Ph.J., Kyle-Henney S. Development of Continuosly-Rreinforced Metal Matrix Composite for Aerospace Applications // Comprehensive Composite Materials II. 2018. Vol. 4. P. 439–463. DOI: 10.1016/B 978-0-12-803581-8.09983-5.

#### References

1. Method for producing products based on silicon nitride: pat. 2239613. Rus. Federation; appl. 02.10.03; publ. 11.10.04.
2. Vikulin V. Production of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Based Articles and Their Application in Aerospace Industry. *Advances in Science and Technology*, 2006, vol. 45, pp. 1751–1758.
3. Bhatnagar A. *World of Materials. Lightweight Ballistic Materials*. Moscow: Tekhnosfera, 2000, 392 p.
4. Molded porous ceramic article containing SiC and proses for the production there of: pat. 7648932B2 US; appl. 07.05.06; publ. 19.01.10.
5. Method for producing an abrasive compact: pat. 2176191 B1 EP; appl. 23.07.08; publ. 21.04.10.
6. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 1018577/ 2071-9140-2015-0-1-3-33.

7. *Ceramic oxidation-resistant composite material and products made from it*: pat. 2560046 C1 Rus. Federation; appl. 10.07.14; publ. 20.08.15.
8. *Ceramic composite material and products made from it*: pat. 2700428 C1 Rus. Federation; appl. 17.09.17; publ. 18.07.18.
9. *Heat-resistant low-shrinkage material based on silicon carbide*: a.s. 197832 USSR; appl. 19.08.81; publ. 17.09.82.
10. Vikulin V., Leshuk T. Material based chemically strengthened silicon carbide. *Refractories and Industrial Ceramics*, 1992, vol. 32, no. 9–10, pp. 510–515.
11. Vikulin V., Leshchuk T. Materials based on chemically strengthened silicon carbide. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 1991, no. 10, pp. 8–12.
12. *Method for processing products from ceramic materials based on silicon carbide and/or carbon*: pat. 2276661 Rus. Federation; appl. 28.07.04; publ. 20.05.06.
13. Vikulin V., Romashin A., Leshuk T. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Si composite ceramics and chemically toughened SiC for engine components. *Ceramics in Energy Applications. 2<sup>nd</sup> International conference proceedings*. London, 1994, pp. 21–32.
14. Vikulin V., Kostina L., Leshchuk T., Shtarev G. Low-shrinkage silicon carbide products. *Designs and technologies for producing products from non-metallic materials*. Moscow: VIMI, 1988, pp. 33–34.
15. Suvorov S., Chaykun E., Gusarov V. Multilayer oxidation-resistant materials based on silicon carbide. *Oborudovanie, materialy, protsessy*. Moscow: VIMI, 1989, is. 3, pp. 29–30.
16. *Protective siliconoxinitride coating for porous refractories*: pat. 4187344A US; appl. 27.09.78; publ. 05.02.80.
17. *Method for protecting the surface of silicon carbide during high-temperature etching*: a. s. 270080 USSR; appl. 05.03.74; publ. 12.05.75.
18. *Materials based on low-shrinkage silicon carbide*: a. s. 235082 USSR; appl. 27.02.84; publ. 24.03.85.
19. Doorbar Ph.J., Kyle-Henney S. Development of Continuously-Reinforced Metal Matrix Composite for Aerospace Applications. *Comprehensive Composite Materials II*, 2018, vol. 4, pp. 439–463. DOI: 10.1016/B 978-0-12-803581-8.09983-5.

**Информация об авторах**

**Викулин Владимир Васильевич**, помощник генерального директора по науке, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru  
**Гвоздев Святослав Сергеевич**, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Information about the authors**

**Vladimir V. Vikulin**, Assistant Director General for Science, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru  
**Svyatoslav S. Gvozdev**, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 18.04.2025; получена после доработки 30.04.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.05.2025.  
The article was submitted 18.04.2025; received in revised form 30.04.2025; approved and accepted for publication after reviewing 30.05.2025.