

Научная статья

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-117-126

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

А.Ю. Колмогоров¹, О.Ю. Сорокин¹, М.Л. Ваганова¹, А.С. Чайникова¹

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

Аннотация. Исследованы структура и физико-механические свойства композиционного материала на основе карбида кремния, армированного металлическими волокнами. Определено оптимальное содержание армирующей фазы, проведено модифицирование поверхности волокон для повышения адгезии с матрицей. Проведены испытания на ударную вязкость. Определена прочность при трехточечном изгибе и значение температурного коэффициента линейного расширения. Установлено, что введение волокон в хрупкую керамическую матрицу способствует перераспределению напряжений в объеме композиционного материала, что приводит к повышению сопротивления ударным и изгибающим нагрузкам. Выявлена зависимость прочностных характеристик от количества армирующего наполнителя.

Ключевые слова: карбид кремния, композиционный материал, армирование, внутренние напряжения, наполнитель, матрица

Для цитирования: Колмогоров А.Ю., Сорокин О.Ю., Ваганова М.Л., Чайникова А.С. Изучение структуры и физико-механических свойств армированного композиционного материала на основе карбида кремния // Труды ВИАМ. 2026. № 2 (156). С. 117–126. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-117-126.

Scientific article

STUDY OF THE STRUCTURE AND PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF REINFORCED COMPOSITE MATERIAL BASED ON SILICON CARBIDE

A.Yu. Kolmogorov¹, O.Yu. Sorokin¹, M.L. Vaganova¹, A.S. Chaynikova¹

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

Abstract. The structure and physical and mechanical properties of a silicon carbide-based composite material reinforced with metallic fibers were studied. The optimal content of the reinforcing phase was determined, and the fiber surface was modified to improve adhesion to the matrix. Impact toughness, three-point bending strength, and the coefficient of linear thermal expansion were measured. It was found that fiber reinforcement contributes to the redistribution of internal stresses, leading to improved resistance to impact and bending loads. A correlation was revealed between the strength characteristics and the amount of the reinforcement.

Keywords: silicon carbide, composite material, internal stresses, dispersed composition, filler, matrix

For citation: Kolmogorov A.Yu., Sorokin O.Yu., Vaganova M.L., Chaynikova A.S. Study of the structure and physical and mechanical properties of reinforced composite material based on silicon carbide. *Trudy VIAM*, 2026, no. 2 (156), P. 117–126. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-117-126.

Введение

Область применения композита во многом зависит от выбора материалов керамической матрицы и армирующего наполнителя [1–3]. Для получения конструкционных материалов, сочетающих высокую жесткость, термическую и химическую стойкость с возможностью получения изделий сложной формы, наиболее часто применяют порошки карбида кремния. Карбидокремниевая керамика обладает высокой твердостью (до 45 ГПа), модулем упругости 380–430 ГПа, низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР: $\alpha = (3,5-4,0) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), а также устойчивостью к воздействию агрессивных сред и высоких температур [4–6]. Прежде всего, материалы на основе карбида кремния наиболее востребованы для изготовления высокотемпературных коррозионно- и эрозионностойких изделий в нефтедобывающей, энергетической, химической, аэрокосмической отраслях и др. [7–11].

Несмотря на высокие физико-химические и физико-механические характеристики керамических материалов на основе SiC, основным недостатком, ограничивающим использование карбидокремниевых материалов в различных отраслях промышленности, является их хрупкость при воздействии ударных и динамических нагрузок. Повышение прочности керамических материалов – важная область в исследовании и получении высокотемпературных материалов.

В научно-технической литературе рассматриваются несколько способов армирования керамических материалов, позволяющих значительно повысить значение их трещиностойкости/ударной вязкости (критического коэффициента интенсивности напряжений – K_{Ic}). Следует отметить, что дисперсное упрочнение керамических матриц, в том числе на основе карбида кремния, металлическими/керамическими порошками, дискретными волокнами, вискерами (нитевидными кристаллами), углеродными нанотрубками, как правило, не приводит к многократному увеличению значений K_{Ic} и дисперсно-армированные керамические композиционные материалы (ККМ) по-прежнему демонстрируют хрупкое разрушение. Армирование ККМ керамическими, углеродными и металлическими волокнами позволяет получить материал с более высоким значением K_{Ic} по сравнению с неармированной карбидокремниевой керамикой. Таким образом, хрупкая керамическая матрица модифицируется высокопрочным и высокопластичным металлическим компонентом в форме волокон, равномерно распределенных в структуре материала. Армированные ККМ показывают более высокие (по сравнению с неармированным ККМ) результаты с точки зрения повышения устойчивости к разрушению и придания хрупкой матрице на основе SiC псевдопластичного поведения при разрушении [9–11].

Важным фактором, повышающим прочностные характеристики и трещиностойкость армированного керамического материала, является образование внутренних напряжений в структуре материала за счет разницы значений ТКЛР между матрицей и армирующим наполнителем. Карбидокремниевая матрица характеризуется более низким значением ТКЛР по сравнению с наполнителем, что при охлаждении после спекания приводит к формированию сжимающих напряжений в матрице. Эти напряжения препятствуют развитию трещин и увеличивают устойчивость материала к воздействию механических нагрузок. Применение стальных волокон в качестве армирующего наполнителя значительно улучшает эксплуатационные характеристики ККМ благодаря их высокой прочности, эластичности и способности воспринимать и перераспределять внешние нагрузки в структуре полученного материала [12–16].

В данной работе исследованы внутренние напряжения, физико-механические характеристики и микроструктура полученного металлокерамического материала. При использовании разнородных материалов происходит образование пластических и эластичных напряжений на границе раздела матрицы и армирующего наполнителя, также возможно возникновение трещин на границе контакта матрицы и наполнителя,

вызванных их различным термическим расширением. Для того чтобы избежать развития дефектов в структуре, необходимы регулирование микроструктуры металлокерамического материала и подбор вида и количества армирующего наполнителя.

Материалы и методы

Для изготовления образцов стеклокерамического композиционного материала (СККМ) в качестве матрицы применяли карбид кремния отечественного производства (SiC, техническая чистота – не менее 99 %) и фриттизированный стеклопорошок. В качестве армирующего элемента использовали стальные волокна, равномерно распределенные по всему объему материала. Формирование композита осуществляли методом «теплого» прессования при температуре до 1500 °С и давлении 20 МПа с последующим охлаждением на воздухе.

Определение значений ТКЛР композиционного материала проводили с использованием высокотемпературного dilatометра в диапазоне температур от 20 до 1000 °С. Скорость нагрева составляла 25 °С/мин. Испытания проводили в атмосфере воздуха.

Испытания на ударную вязкость по методу Шарпи проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 9454–78. Для оценки ударной прочности использовали образцы размером 55×5×5,5 мм с U-образным надрезом. Испытания проводили на маятниковом копре с номинальным энергоресурсом маятника, равным 25 Дж.

Структуру полученных образцов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии. Анализ микроструктуры позволил оценить качество распределения армирующего наполнителя и наличие дефектов на границе контакта керамической матрицы и армирующего наполнителя.

Плотность и открытую пористость керамического материала определяли методом гидростатического взвешивания в соответствии с ГОСТ 2409–95. Образцы высушивали в сушильном шкафу до постоянной массы, затем измеряли плотность и пористость полученного керамического материала. Взвешивание проводили на воздухе и в дистиллированной воде при температуре 20±1 °С с точностью до 0,001 г.

Метод расчета внутренних напряжений в ККМ основывается на определении внутренних деформаций материалов, вызванных разницей значений ТКЛР.

Измерение параметров шероховатости R_a и R_z проводили с использованием оптического профилометра по бесконтактному методу сканирования микронеровностей на основе оптико-триангуляционного принципа. Прибор формирует 3D-профиль поверхности путем регистрации интенсивности отраженного света, определяемой рельефом исследуемой поверхности.

Исследование прочностных характеристик полученного СККМ, изготовленного методом «теплого» прессования на воздухе, проводили по методу статического трехточечного изгиба для образцов, обладающих показателем открытой пористости <1 %.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Стеклокерамический композиционный материал, армированный стальными волокнами, получен методом «теплого» прессования на воздухе и обладает следующими физико-механическими характеристиками: прочность при трехточечном изгибе 220–245 МПа, плотность $(2,9–3,1)±0,1$ г/см³, пористость 0,4–0,8 %. За счет введения в структуру СККМ армирующих волокон увеличились показатели плотности и прочности по сравнению с физико-механическими характеристиками неармированного материала с прочностью 185–200 МПа, плотностью $2,7±0,1$ г/см³ и пористостью <0,5 %.

При исследовании определены средние значения ТКЛР образцов из стеклокерамики, армированной стальной сеткой, в диапазоне температур 20–800 °С при скорости нагрева 25 °С/мин. Полученные результаты демонстрируют выраженную зависимость значений ТКЛР от содержания армирующего компонента:

Содержание армирующего наполнителя, %	ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$
0	4,6024
<5	4,9119
>5	5,3434

Для неармированного образца керамического материала ТКЛР составил $4,6024 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, что соответствует типичным значениям для малорасширяющихся композиционных материалов. При введении <5 % армирующей стальной сетки наблюдается повышение ТКЛР до $4,9119 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, а при дальнейшем увеличении содержания сетки до >5 % – до $5,3434 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. Возрастание значений ТКЛР объясняется высоким значением ТКЛР стали по сравнению с аналогичной характеристикой для карбидокремниевой матрицы керамического материала. При нагреве стальные волокна оказывают влияние на деформационные процессы в композите, увеличивая общее тепловое расширение материала. Полученные данные демонстрируют почти линейную тенденцию увеличения ТКЛР с ростом содержания армирующего компонента.

Измерение ударной вязкости композиционного материала, армированного стальными волокнами, позволяет оценить его способность к сопротивлению динамическим нагрузкам, приводящим к хрупкому разрушению керамического материала. Для неармированных керамических материалов, обладающих высокой жесткостью и твердостью, характерен низкий уровень ударной вязкости, что делает их уязвимыми для разрушения при ударных или вибрационных воздействиях. Введение в структуру керамического материала армирующего наполнителя изменяет механизм разрушения. Армирующие волокна не только перераспределяют внешние нагрузки, снижая концентрацию напряжений в критических зонах, но и принимают на себя часть энергии удара.

Таблица 1

Определение ударной вязкости неармированного и армированного керамического материала

Керамический материал	Номинальный энергоресурс маятника, Дж	Работа разрушения, Дж	Ударная вязкость, кДж/м ²
Неармированный	25	0,4	6,43
Армированный	25	1,7	20,84

В табл. 1 показано, что введение в состав СККМ армирующих волокон приводит к возрастанию энергии и работы разрушения более чем в 3 раза при одинаковом номинальном энергоресурсе маятника (по сравнению с неармированным керамическим материалом). Для неармированного материала ударная вязкость составила 6,43 кДж/м², для армированного: 20,84 кДж/м². Соответственно, работа разрушения возросла с 0,4 Дж (у неармированного образца) до 1,7 Дж (у армированного), что также подтверждает повышение энергопоглощающей способности материала за счет введения армирующего компонента.

Подтверждение эффективности армирования получено при анализе микрофотографий образцов после испытаний на ударную вязкость. На рис. 1, в наблюдаются вытягивание и деформация стальной проволоки, что указывает на ее активное участие в диссипации энергии и замедлении развития трещины, а это свидетельствует об активной работе армирующего наполнителя при разрушении.

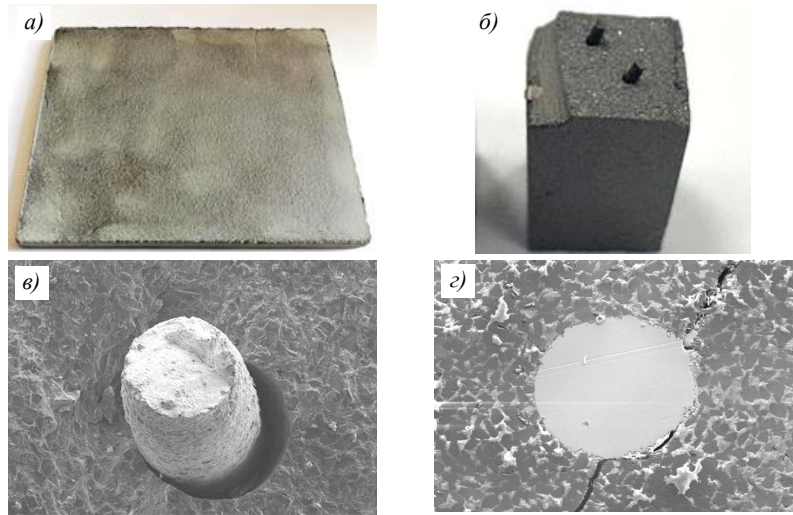


Рис. 1. Образец из композиционного материала на основе карбида кремния размером $200 \times 150 \times 10$ мм: *a* – внешний вид образца; *б* – фрактограмма поверхности разрушения экспериментального образца с сечением 5×5 мм после испытания на ударную вязкость по Шарпи; *в* – вытягивание стальной проволоки из керамической матрицы с образованием деформационной шейки; *г* – огибание трещиной стальной проволоки

На рис. 1, *г* показано, как трещина огибает стальную проволоку, что вызвано присутствием интерфейсного слоя со слабым сцеплением на границе контакта «матрица–армирующий наполнитель». Для устранения подобного межфазного разрушения и для повышения эффективности армирования стеклокерамической матрицы необходимо предварительно модифицировать поверхность применяемого стального армирующего наполнителя (рис. 2). Данная процедура направлена на увеличение площади контакта между армирующим наполнителем и матрицей.

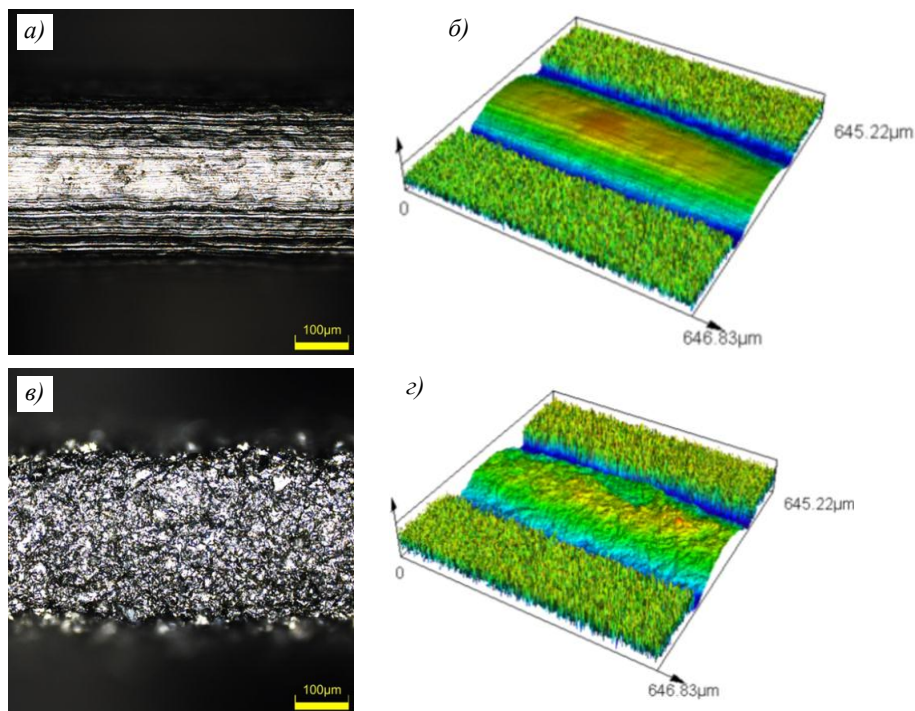


Рис. 2. Поверхность стального армирующего наполнителя до и после модификации поверхности: *a*, *в* – микрофотографии исходной и модифицированной поверхности соответственно; *б*, *г* – 3D-модели исходной и модифицированной поверхности соответственно

В результате обработки на поверхности проволоки образуются неровности (рис. 2), обеспечивающие более высокое механическое сцепление армирующего элемента с окружающей матрицей (по сравнению с немодифицированным наполнителем). Данный подход аналогичен широко применяемой поверхностной обработке арматурной стали в железобетонных конструкциях, где шероховатость арматуры способствует эффективной передаче напряжений от бетона к металлическому стержню [17, 18].

Увеличение шероховатости поверхности способствует более равномерному распределению напряжений в приграничной зоне, снижает их концентрацию и препятствует инициированию межфазных трещин. Кроме того, модифицированная поверхность улучшает механическое сцепление армирующих волокон в матрице композита, аналогично материалам на цементной основе [19–22]. Таким образом, предварительная обработка армирующего наполнителя является критически важным этапом подготовки армирующего компонента, направленной на улучшение межфазного взаимодействия, повышение прочности при ударе и общей структурной целостности материала. Параметры шероховатости поверхности для исходных и модифицированных армирующих волокон (R_a и R_z) приведены в табл. 2, где: R_a – среднее арифметическое абсолютных значений отклонения от средней линии по заданной длине измерения; R_z – среднее арифметическое пяти наибольших выступов и пяти наибольших глубин в пределах средней линии по заданной длине измерения.

Таблица 2

Параметры шероховатости (R_a и R_z) исходной и модифицированной поверхностей армирующего волокна

Состояние поверхности	R_z , мкм	R_a , мкм
Исходное	1,26	0,24
Модифицированное	8,43	1,73

Для расчета внутренних термически индуцированных напряжений в ККМ с добавлением стеклосвязки можно использовать формулу линейных термических напряжений. Величину относительной деформации материала можно рассчитать по формуле

$$\varepsilon = \Delta\alpha \cdot \Delta T,$$

где ε – относительная деформация, мкм/м; α – температурный коэффициент линейного расширения; ΔT – разница между температурами стеклования и размягчения стеклянной связки, К.

Известно, что ТКЛР стеклокерамической матрицы равен $\sim 4,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (α_1), ТКЛР стального армирующего наполнителя составляет $\sim 17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (α_2). Разница между температурами стеклования и размягчения стеклянной связки составляет $\sim 477 \text{ K}$, тогда

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \alpha_2 - \alpha_1 = (17,0 - 4,6) \cdot 10^{-6} = 12,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \\ \varepsilon &= \Delta\alpha \cdot \Delta T = 12,4 \cdot 10^{-6} \cdot 477 = 5914,8 \cdot 10^{-6} = 0,0059148. \end{aligned}$$

Остаточные внутренние напряжения в материале можно рассчитать по формуле

$$\sigma = E \cdot \varepsilon,$$

где σ – остаточные внутренние напряжения, Па; ε – относительная деформация, мкм/м; E – модуль упругости, МПа.

Модуль упругости для стального армирующего наполнителя составляет $200 \cdot 10^9 \text{ Па}$, тогда вычислим остаточные внутренние напряжения в СККМ:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = 200 \cdot 10^9 \cdot 0,0059148 \approx 1,18296 \cdot 10^9 \text{ Па} \approx 1183 \text{ МПа}.$$

Следует отметить, что такое значение σ значительно превышает типичные пределы текучести используемой в качестве наполнителя стали, поэтому в реальной системе будет иметь место пластическая релаксация стали и/или разрушение матрицы. Полученная величина служит верхней теоретической границей термически обусловленных внутренних напряжений в материале. Для более реалистичной оценки необходима модели с учетом упругопластического поведения стали, жесткости матрицы и расположения (распределения) армирующего наполнителя в структуре материала. При таком уровне внутренних напряжений, возникающих в структуре композиционного материала, возможно получение предварительно напряженного керамического материала, что приводит к повышению трещиностойкости и прочностных характеристик материала и изделий на его основе за счет увеличения энергоемкости процесса разрушения и трещинообразования.

Заключения

Полученный ККМ, армированный стальными волокнами, обладает следующими физико-механическими характеристиками: прочность 220–245 МПа, плотность $(2,9-3,1) \pm 0,1$ г/см³, пористость 0,4–0,8 %.

Проведенный анализ температурного линейного расширения СККМ показал, что введение стальных армирующих волокон существенно влияет на величину ТКЛР. Для неармированного образца керамического материала ТКЛР составил $4,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. При введении <5 % армирующего стального наполнителя ТКЛР составляет $4,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а при >5 % достигает $5,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Полученные результаты подтверждают, что армирование металлическими волокнами приводит к росту термической подвижности материала. Увеличение значений ТКЛР с возрастанием содержания армирующего компонента указывает на наличие теплового взаимодействия между матрицей и наполнителем.

В результате исследования установлено, что модификация поверхности стального волокна приводит к существенному изменению микрогеометрических параметров. Для исходной (немодифицированной) поверхности значения среднеарифметического отклонения профиля R_a и высоты неровностей профиля R_z составили 0,24 и 1,26 мкм соответственно. После модификации поверхности данные показатели возросли до 1,73 мкм (R_a) и 8,43 мкм (R_z), что указывает на значительное изменение микрорельефа стального армирующего наполнителя. Полученные результаты свидетельствуют о том, что примененный метод модификации эффективно формирует развитую поверхность, что способствует улучшению контакта матрицы и армирующего наполнителя при использовании проволоки в качестве армирующего наполнителя в композиционных материалах.

Результаты измерений ударной вязкости показали существенное повышение прочности СККМ при армировании стальными волокнами. Для неармированного керамического материала ударная вязкость составила $\sim 6,4$ кДж/м², тогда как при армировании стальными волокнами этот показатель увеличился более чем в 3 раза – до 20,84 кДж/м². Повышение сопротивления ударным нагрузкам обусловлено не только наличием армирующего наполнителя, но и формированием внутренних сжимающих напряжений в структуре материала. Расчетная величина этих напряжений составляет 1183 МПа, что способствует повышению трещиностойкости за счет торможения распространения микротрещин. Таким образом, армирование стальными волокнами не только усиливает композиционный материал механически, но и создает благоприятное напряженное состояние в матрице, увеличивая ее стойкость к разрушению.

Необходимо регулировать состав СККМ и тщательно подбирать материал металлических волокон для получения наиболее близких значений ТКЛР матрицы и армирующего наполнителя для регулирования количества остаточных внутренних напряжений в материале.

Список источников

1. Breede F., Hofmann S., Jain N., Jemmali R. Design, manufacture, and characterization of a carbon fiber-reinforced silicon carbide nozzle extension // *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2016. Vol. 13. No. 1. P. 3–16.
2. Krenkel W. Carbon fibre reinforced silicon carbide composites (C/SiC, C/C–SiC) // *Handbook of Ceramic Composites* / ed. N.P. Bansal. New York, USA: Springer Science+Business Media Inc., 2005. P. 117–148.
3. Krenkel W., Berndt F. C/C–SiC composites for space applications and advanced friction systems // *Materials Science and Engineering A*. 2005. Vol. 412. No. 1–2. P. 177–181.
4. Семейко К.В., Малиновский А.И., Гребеньков А.Ж. и др. Разработки технологий получения карбида кремния (обзор) // *Вестник НЯЦ РК*. 2021. № 2. С. 30–41.
5. Кхин М., Попова Н.А., Лукин Е.С. Композиционная керамика на основе карбида кремния // *Новые огнеупоры*. 2019. № 4. С. 34–39.
6. Бабашов В.Г., Варрик Н.М., Максимов В.Г., Самородова О.Н. Оксидное волокно с покрытием карбида кремния для создания композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). С. 94–104. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-94-104.
7. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). С. 122–144. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
8. Гаршин А.П., Нилов А.С., Галинская О.О., Краснов В.И. Перспективы развития и пути совершенствования авиационных тормозных систем на базе керамоматричных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). С. 104–121 (дата обращения: 02.06.2025). URL: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-104-121.
9. Житнюк С.В. Бескислородные керамические материалы для аэрокосмической техники (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2018. № 8 (68). С. 81–88. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88.
10. Евдокимов С.А., Щеголева Н.Е., Качаев А.А. Способы соединения керамических композиционных материалов на основе SiC с керамическими и металлическими материалами (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 3 (68). С. 75–83. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-75-83.
11. Толмачев Я.В., Заварзин С.В., Лощина А.О., Князев А.В. Высокотемпературная оксидная коррозия керамических материалов ГТД // *Труды ВИАМ*. 2023. № 7 (125). С. 69–83. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-69-83.
12. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Щур П.А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 2 (108). С. 32–51. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
13. Перевислов С.Н., Беспалов И.А., Томкович М.В. Влияние модифицирования структуры материалов на основе карбида кремния на их динамические свойства // *Новые огнеупоры*. 2018. № 7. С. 39–44.
14. Петров В.М., Козлов С.Д. Стеклокристаллические и стеклокерамические материалы: учебное пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 256 с.
15. Тулин А.А. Стеклокерамика: структура, свойства, применение. М.: Наука, 2005. 312 с.
16. Лебедев А.Н., Михайлов В.В. Композиционные материалы на основе стеклокерамики и металлов. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 228 с.
17. Кузнецов В.А. Арматура железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1985. 240 с.
18. Иванов А.Л. Влияние состояния поверхности арматуры на прочность сцепления с бетоном // *Бетон и железобетон*. 2001. № 9. С. 14–17.
19. Трушников Д.Н. Поведение волокнистых армирующих элементов в композитах при динамических нагрузках // *Физика прочности и пластичности материалов*. 2012. Т. 24. № 3. С. 125–131.

20. Briggs J. Engineering ceramics in Europe and the USA. Worcester, 2011. 331 p.
21. Crouch I.G. Characterization, significance and detection of manufacturing defects in Reaction Sintered Silicon Carbide armour materials // *Ceramics International*. 2015. No. 9. P. 11581–11591.
22. Дякин П.В., Пивинский Ю.Е., Прохоренков Д.С., Дороганов В.А. Фазовый состав, структура и некоторые свойства материалов на основе ВКВС боксита композиционного состава в системе $Al_2O_3-SiO_2-SiC$ // *Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова*. 2020. № 2. С. 115–125.

References

1. Breede F., Hofmann S., Jain N., Jemmali R. Design, manufacture, and characterization of a carbon fiber-reinforced silicon carbide nozzle extension. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2016, vol. 13, no. 1, pp. 3–16.
2. Krenkel W. Carbon fibre reinforced silicon carbide composites (C/SiC, C/C–SiC). *Handbook of Ceramic Composites*. Ed. N.P. Bansal. New York, USA: Springer Science+Business Media Inc., 2005, pp. 117–148.
3. Krenkel W., Berndt F. C/C–SiC composites for space applications and advanced friction systems. *Materials Science and Engineering A*, 2005, vol. 412, no. 1–2, pp. 177–181.
4. Semeyko K.V., Malinovsky A.I., Grebenkov A.Zh. et al. Development of technologies for producing silicon carbide (review). *Vestnik NYATS RK*, 2021, no. 2, pp. 30–41.
5. Khin M., Popova N.A., Lukin E.S. Composite ceramics based on silicon carbide. *Novye ognepory*, 2019, no. 4, pp. 34–39.
6. Babashov V.G., Varrik N.M., Maksimov V.G., Samorodova O.N. Oxide fiber coated with silicon carbide for producing composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), pp. 94–104. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-94-104.
7. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
8. Garshin A.P., Nilov A.S., Galinskaya O.O., Krasnov V.I. Prospects for development and ways to improve aircraft braking systems on the base ceramic matrix composite materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 104–121. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-104-121.
9. Zhitnyuk S.V. Oxygen-free ceramic materials for the space technics (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 8 (68), pp. 81–88. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 02, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88.
10. Evdokimov S.A., Shchegoleva N.E., Kachaev A.A. Methods for joining ceramic composite materials based on SiC with ceramic and metallic materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), pp. 75–83. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-75-83.
11. Tolmachev Ya.V., Zavarzin S.V., Loshchinina A.O., Knyazev A.V. High temperature oxide corrosion of ceramic materials in turbine engines. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), pp. 69–83. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 02, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-69-83.
12. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Schur P.A. Application of functional and adaptive materials obtained by 3D printing (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), pp. 32–51. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 02, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
13. Perevislov S.N., Bepalov I.A., Tomkovich M.V. Effect of Modifying the Structure of Silicon Carbide-Based Materials on Their Dynamic Properties. *Novye ognepory*, 2018, no. 7, pp. 39–44.
14. Petrov V.M., Kozlov S.D. *Glass-crystalline and glass-ceramic materials: a tutorial*. Moscow: Bauman Moscow State Tech. Univ., 2012, 256 p.
15. Tulin A.A. *Glass-ceramics: structure, properties, application*. Moscow: Nauka, 2005, 312 p.
16. Lebedev A.N., Mikhailov V.V. *Composite materials based on glass-ceramics and metals*. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2010, 228 p.

17. Kuznetsov V.A. *Reinforcement of Reinforced Concrete Structures*. Moscow: Stroyizdat, 1985, 240 p.
18. Ivanov A.L. Influence of Reinforcement Surface Condition on the Strength of Adhesion to Concrete. *Beton i zhelezobeton*, 2001, no. 9, pp. 14–17.
19. Trushnikov D.N. Behavior of Fibrous Reinforcing Elements in Composites under Dynamic Loads. *Fizika prochnosti i plastichnosti materialov*, 2012, vol. 24, no. 3, pp. 125–131.
20. Briggs J. *Engineering ceramics in Europe and the USA*. Worcester, 2011, 331 p.
21. Crouch I.G. Characterization, significance and detection of manufacturing defects in Reaction Sintered Silicon Carbide armour materials. *Ceramics International*, 2015, no. 9, pp. 11581–11591.
22. Dyakin P.V., Pivinsky Yu.E., Prokhorenkov D.S., Doroganov V.A. Phase composition, structure and some properties of materials based on bauxite HCBS of composite composition in the Al_2O_3 – SiO_2 –SiC system. *Vestnik BGTU imeni V.G. Shukhova*, 2020, no. 2, pp. 115–125.

Информация об авторах

Колмогоров Андрей Юрьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сорокин Олег Юрьевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ваганова Мария Леонидовна, начальник лаборатории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чайникова Анна Сергеевна, начальник Научно-исследовательского отделения, к.т.н. НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Andrei Yu. Kolmogorov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Oleg Yu. Sorokin, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maria L. Vaganova, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anna S. Chaynikova, Head of Scientific Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 21.08.2025.
The article was submitted 06.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 21.08.2025.