

Научная статья

УДК 661.183.4-911.48

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-88-97

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНОГО СОДЕРЖАНИЯ ГРАФЕНА НА СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Ю.Е. Лебедева¹, Н.Е. Щеголева¹, А.И. Гуляев¹, М.В. Турченко¹

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

Аннотация. Исследовано влияние содержания графена на физико-механические свойства и стойкость к окислению образцов из керамического композиционного материала (ККМ), полученных методом горячего прессования. Введение графена в количестве 1–2 % (объемн.) привело к увеличению микротвердости ККМ с 24,8 до 26,5 ГПа, снижению открытой пористости с 0,8 до 0,2 % и увеличению стойкости к окислению при температуре 1500 °С на 63 %. Проведено исследование структуры графена с гексагональной кристаллической решеткой методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии: графен имеет чешуйчатую осколочную структуру с размером агломератов от 1 до 8 мкм.

Ключевые слова: горячее прессование, керамический композиционный материал, графен, борид циркония, карбид кремния, консолидация

Для цитирования: Лебедева Ю.Е., Щеголева Н.Е., Гуляев А.И., Турченко М.В. Исследование влияния различного содержания графена на свойства керамического композиционного материала // Труды ВИАМ. 2022. № 8 (114). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-88-97.

Scientific article

STUDY OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT GRAPHENE CONTENTS ON THE PROPERTIES OF A CERAMIC COMPOSITE MATERIAL

Yu.E. Lebedeva¹, N.E. Shchegoleva¹, A.I. Gulyaev¹, M.V. Turchenko¹

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 effect of graphene content on the physical and mechanical properties and oxidative resistance of samples of ceramic composite material (CCM) obtained by hot pressing has been studied. The introduction of graphene in an amount of 1–2 vol. % led to an increase in the microhardness of CMC from 24,8 to 26,5 GPa, a decrease in open porosity from 0,8 to 0,2 %, and an increase in oxidation resistance at a temperature of 1500 °C by 63 %. The structure of graphene with a hexagonal crystal lattice was studied by scanning and transmission electron microscopy: graphene has a scaly fragmentation structure with agglomerate sizes from 1 to 8 μm.

Keywords: hot pressing, ceramic composite, graphene, zirconium boride, silicon carbide, consolidation

For citation: Lebedeva Yu.E., Shchegoleva N.E., Gulyaev A.I., Turchenko M.V. Study of the influence of different graphene contents on the properties of a ceramic composite material. *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-88-97.

Введение

Среди разнообразия высокотемпературной керамики диборид циркония (ZrB_2) привлекает все большее внимание благодаря таким свойствам, как высокие температура плавления, прочность, теплопроводность и электрическая проводимость, а также низкая плотность и химическая инертность. В связи с постоянным расширением знаний о свойствах керамических композиционных материалов (ККМ) расширяются и области их возможного использования – вплоть до функциональных материалов для солнечной и альтернативной энергетики [1–6].

Несмотря на перспективные характеристики материалов на основе ZrB_2 , они имеют и существенные недостатки, такие как неудовлетворительная трещиностойкость и термостойкость. Для решения этой проблемы в настоящее время проводятся исследования по изучению влияния различных добавок на свойства ККМ. Многочисленные работы посвящены модификации ККМ углеродными материалами – волокнами, нанотрубками, графитовыми пластинами и графеном [7–12].

Обычно для спекания ZrB_2 требуются высокая температура, превышающая $2000\text{ }^\circ\text{C}$, и высокое давление. Чтобы улучшить интенсификацию спекания диборида циркония для изготовления композиционных материалов используется множество различных видов добавок для спекания, таких как дисилицид молибдена ($MoSi_2$), карбид кремния (SiC) и др. Более того, ZrB_2 будет окисляться до диоксида циркония (ZrO_2) и оксида бора (B_2O_3) в окислительных условиях при температурах $>800\text{ }^\circ\text{C}$. Доказано, что при высоких температурах ($>1400\text{ }^\circ\text{C}$) силициды окисляются с образованием стеклообразной фазы, которая улучшает стойкость к окислению ККМ на основе диборида циркония. Кроме того, повышение прочности при изгибе композиционных материалов системы ZrB_2 – SiC можно объяснить тем, что SiC ограничивает рост зерен ZrB_2 во время уплотнения. Однако недостаточно высокая вязкость разрушения еще препятствует их широкому применению.

Исследования, проводимые отечественными и зарубежными учеными, показали, что нитевидные кристаллы, чешуйки или короткие волокна могут улучшить механические свойства ККМ. В керамических материалах висеры (нитевидные кристаллы) SiC используются в качестве армирующей фазы благодаря сочетанию высоких прочности и модуля упругости, а также химической инертности. Например, прочность при изгибе монолитной керамики ZrB_2 значительно улучшили за счет добавления SiC_w [1]. В процессе распространения трещины нитевидные кристаллы SiC_w могут вырываться или образовывать перемычки в трещинах, что приводит к повышению вязкости разрушения. Однако некоторое количество нитевидных кристаллов SiC_w будет распадаться на частицы во время процесса высокотемпературного спекания, что ослабит их упрочняющий эффект. Поэтому в некоторых работах основное внимание уделяется тому, как получить плотные композиционные материалы системы ZrB_2 – SiC_w при более низкой температуре с использованием третьей фазы. Более того, комбинация различных механизмов упрочнения, вызванных добавлением второй и третьей фаз, может дополнительно повысить уровень вязкости разрушения ККМ. В настоящее время для упрочнения композиционных материалов на основе ZrB_2 используют нитевидные кристаллы SiC и графен. Механизмы упрочнения в основном включают вытягивание графена и нитевидных кристаллов, перекрытие графеновой трещины и ее трехмерное отклонение. Предполагается, что механические свойства ККМ будут улучшены за счет синергетического эффекта нитевидных кристаллов SiC и графена [1, 2].

Добавление в ККМ углеродистых материалов, таких как карбиды бора, вольфрама и ванадия (B_4C , WC и VC), приводит к тому, что они реагируют с оксидными примесями на поверхности частиц ZrB_2 , что интенсифицирует процесс спекания

и повышает физико-механические свойства керамических композитов. В настоящее время графен – слой атомов углерода, расположенных в виде гексагональной структуры, – используют в качестве наноразмерного модифицирующего компонента композиционных материалов (в том числе для улучшения их свойств) ввиду большой удельной площади поверхности, высокого 2D-соотношения и улучшенных механических характеристик. Благодаря высоким прочностям в плоскости XY, теплопроводности и удельной поверхности графен привлекает внимание как достаточно перспективный упрочняющий компонент ККМ, который при незначительном снижении прочности может существенно увеличить их вязкость разрушения.

Цель данной работы – исследование влияния различного объемного содержания графена (1 и 2 % (объемн.)) на физико-механические свойства и стойкость к окислению образцов из ККМ системы ZrB_2-SiC , полученных методом горячего прессования.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 14.1. «Конструкционные керамические композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13].

Материалы и методы

Для исследования физико-механических свойств и стойкости к окислению ККМ системы ZrB_2-SiC изготовлены образцы методом горячего прессования. Для получения данных образцов использовали порошки диборида циркония, карбида кремния и графен с размером агломератов от 2 до 20 мкм.

Для получения гомогенной композиции ZrB_2-SiC проводили совместное перемешивание порошков карбида кремния, диборида циркония и графена на планетарной мельнице. Полученный порошок подвергали горячему прессованию.

Измерение значений открытой пористости и кажущейся плотности образцов выполняли гидростатическим взвешиванием с помощью лабораторных аналитических весов (по ГОСТ 2409–95).

Микротвердость ККМ определяли методом Виккерса (нагрузка – от 1 кг, время индентирования 3 с) на полированных поверхностях ($R_a \approx 0,03$ мкм) с помощью твердомера. Измерения проводили в 10 точках.

Стойкость к окислению ККМ определяли при температуре 1500 °С в течение 8 ч (по ГОСТ Р 57927–2017).

Анализ морфологии образцов проводили методом растровой электронной микроскопии при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе пучка 20 пА. Получены изображения в режиме вторичных электронов при увеличениях $\times 5000$ и $\times 20000$. Исследование структуры материала осуществляли с применением светлопольных и темнопольных методик на просвечивающем электронном микроскопе при ускоряющем напряжении 200 кВ. Образец для исследований помещали на медную сетку.

Фазовый состав керамики определяли с помощью рентгеновского дифрактометра (Cu K_α -излучение).

Результаты и обсуждение

Для исследования влияния содержания графена на физико-механические свойства и стойкость к окислению образцов из ККМ системы ZrB_2-SiC , полученных методом горячего прессования, в шихту вводили 1 и 2 % (объемн.) графена, структуру которого исследовали методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии (рис. 1 и 2).

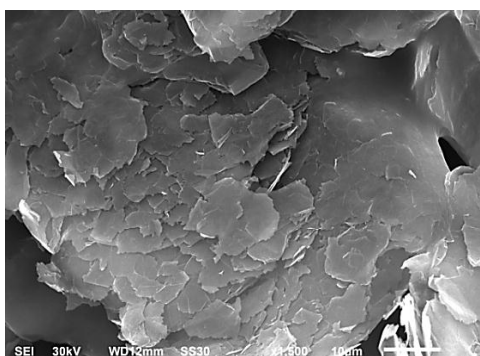


Рис. 1. Структура графена, полученная с помощью метода растровой электронной микроскопии

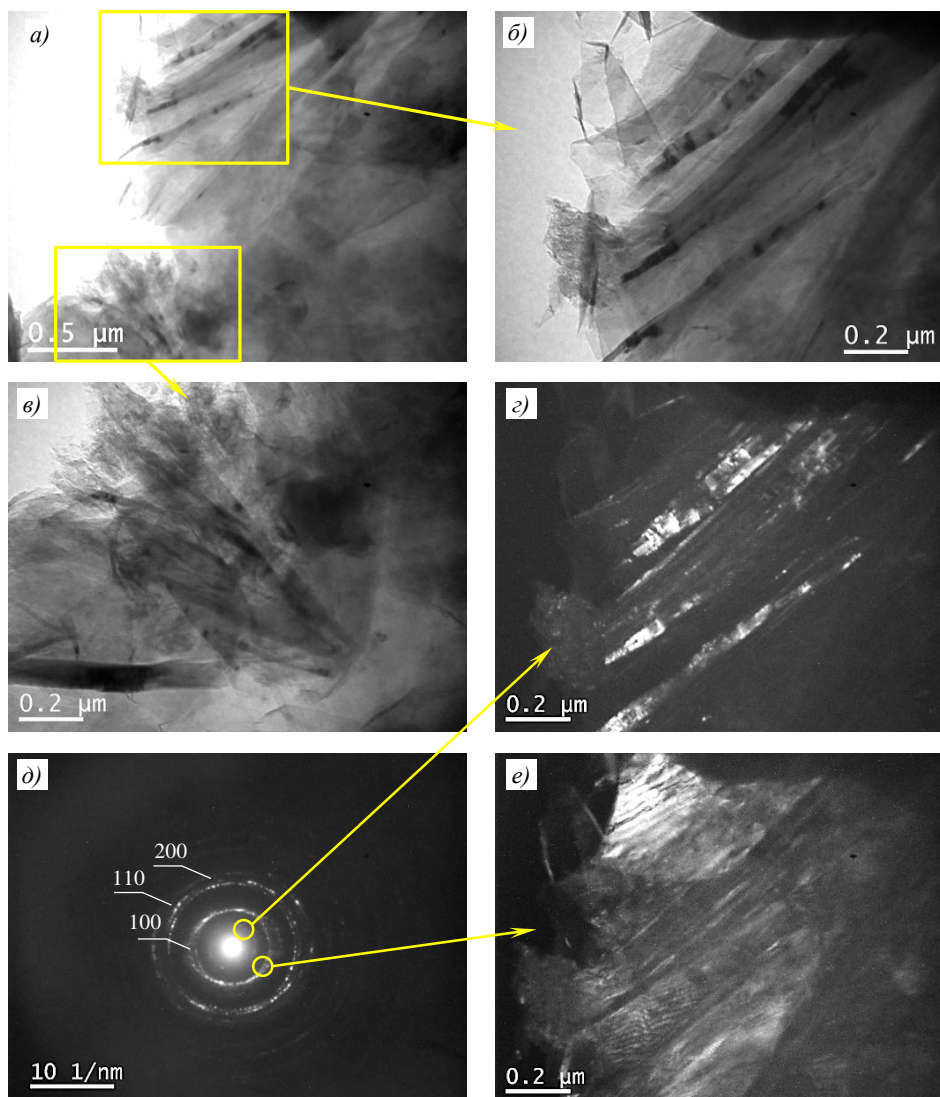


Рис. 2. Результаты исследования структуры графена, выполненного методом просвечивающей электронной микроскопии: *a–в* – светлопольные снимки; *г* – темнопольный снимок в рефлексах, образованных при двойной дифракции на «складках»; *д* – дифракция; *е* – темнопольный снимок в рефлексах кольца

На рис. 1 видно, что графен имеет чешуйчатую осколочную структуру с размером агломератов от 1 до 8 мкм. Фазовый состав графена (рис. 3) представлен в виде единственной фазы – графита (C) с гексагональной кристаллической решеткой

(пространственная группа – $R\bar{6}3/mmc$). Средний размер кристаллитов, по результатам рентгенофлуоресцентного анализа, составляет 0,275 нм.

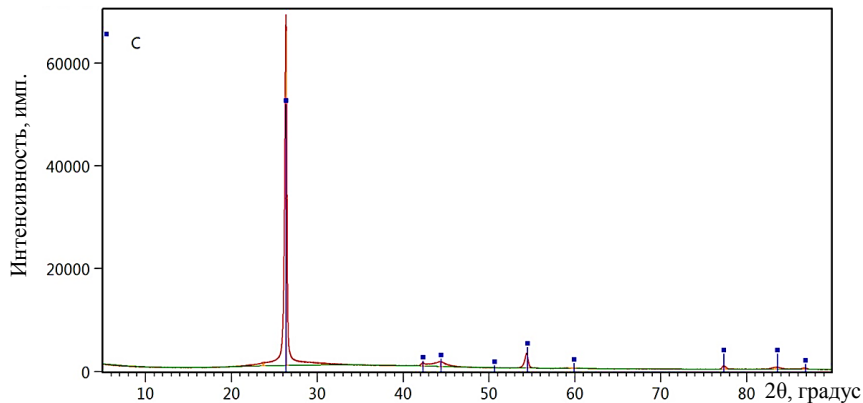


Рис. 3. Дифрактограмма графена

На рис. 2, *a–в* представлены светлопольные, а на рис. 2, *г* – темнопольный снимки графена в рефлексах, образованных при двойной дифракции на «складках», показанной на рис. 2, *д*: видны три кольца, форма колец имеет нарушения из-за отсутствия объема кристаллической решетки, т. е. при отклонениях кристаллической плоскости графена от нормального положения относительно электронного пучка рефлексы на дифракции не исчезают (как в случае с объемной решеткой), однако перемещаются, вследствие чего невозможно точно измерить межплоскостные расстояния по их положению на электронограмме. На темнопольном снимке (рис. 2, *е*) видно, что в рефлексах кольца в результате небольших кристаллографических разворотов фрагментов графена при наложении двух (или более) фрагментов на изображении формируются полосы муара.

Исследование микроструктуры полученных образцов из ККМ показало, что они имеют матрицу на основе диборида циркония, армированную карбидом кремния (рис. 4). В керамическом композите ZrB_2 равномерно распределен по всему объему матрицы. Частицы графена при спекании локализовались в отдельные области, неравномерно распределившиеся по объему матрицы.

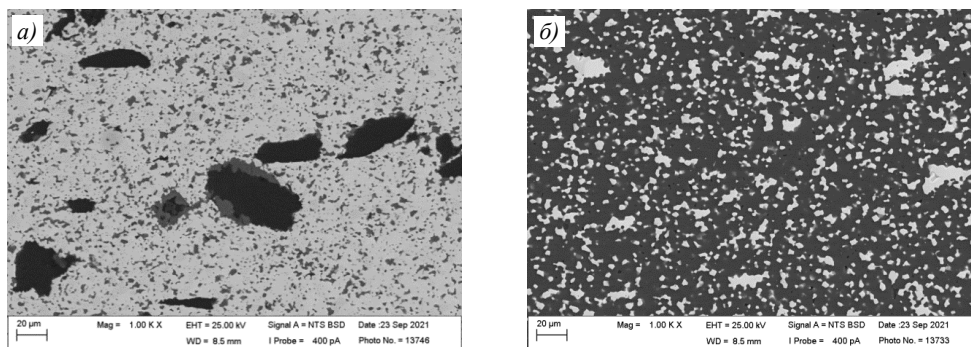


Рис. 4. Структура керамического композиционного материала системы ZrB_2-SiC с графеном (*a*) и без него (*б*)

В таблице представлены значения открытой пористости, кажущейся плотности, микротвердости и стойкости к окислению образцов из ККМ системы ZrB_2-SiC с графеном и без него, полученные с помощью метода горячего прессования. Установлено, что значения открытой пористости уменьшаются при добавлении графена в состав ККМ.

При этом уровень микротвердости образцов, содержащих графен, стал несколько больше, чем у образцов без графена.

Таким образом, введение графена в ККМ привело к улучшению физико-механических характеристик, таких как микротвердость и открытая пористость. В работе [14] установлено, что при введении 0,5 % (по массе) графена в ККМ состава 95,5 % (по массе) Al_2O_3 – 4 % (по массе) ZrO_2 его твердость по Виккерсу увеличивалась с 14,6 до 19,3 ГПа, а вязкость разрушения – с $4,6 \pm 0,05$ до $7,9 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Повышение вязкости разрушения ученые объясняют синергетическим эффектом сильной межфазной адгезии графен/ Al_2O_3 . В работе [15] использовали графеновые нанолиты для упрочнения композитного покрытия системы Al_2O_3 – TiO_2 , получено некоторое увеличение твердости по Виккерсу и значительное улучшение вязкости разрушения. В статьях [16–18] показана попытка упрочнить и повысить твердость ККМ на основе Al_2O_3 путем введения графена, в результате чего достигнуто значительное увеличение показателей прочности и ударной вязкости. Граница раздела в керамических композитах имеет большое значение для уровня механических свойств. В частности, эффективность упрочнения и повышения ударной вязкости, вызванных введением графена в ККМ, может зависеть от характеристик межфазного связывания из-за большой удельной поверхности и высокого 2D-соотношения размеров графена. Как правило, образование сильно-слабых ступенчатых границ раздела в керамических композитах способствует одновременному повышению прочности и ударной вязкости [19, 20]. Формирование этой межфазной структуры в основном зависит от регулирования продуктов межфазной химической реакции, а также от размеров и количества продуктов реакции.

Свойства образцов из керамических композиционных материалов системы ZrB_2 – SiC с графеном

Содержание графена, % (объемн.)	Кажущаяся плотность, г/см ³	Открытая пористость, %	Микротвердость, ГПа	Стойкость к окислению, % (в течение 8 ч при температуре 1500 °С)
0	5,48	0,8	24,8	1,21
1	5,43	0,2	25,4	0,94
2	5,39	0,2	26,5	0,45

Введение графена в ККМ системы ZrB_2 – SiC способствовало снижению открытой пористости благодаря интенсификации процесса спекания за счет связывания кислородсодержащих соединений циркония и кремния (содержание кислорода в SiC и ZrB_2 составило 0,6–0,9 % (по массе)) с образованием карбидов.

Стойкость к окислению керамических композитов при введении графена улучшилась: изменение массы при температуре 1500 °С в течение 8 ч снизилось на 22 % при добавлении 1 % (объемн.) графена, а при добавлении 2 % (объемн.) графена изменение массы снизилось на 63 %. Несомненно, что добавление углеродного компонента должно существенно повлиять на устойчивость к окислению материала в целом. Исследования стойкости к окислению материалов системы ZrB_2 – SiC –графен проводятся довольно редко. В работе [21] установлено, что при окислении керамики системы ZrB_2 – SiC –C в токе воздуха и при температуре 1500 °С формируется слоистая структура, покрытая аморфным слоем диоксида кремния. При этом в соответствии с экспериментальными данными и на основании рассчитанных диаграмм летучести отдельных компонентов системы (ZrB_2 , SiC , C) предложена последовательность окисления в зависимости от давления кислорода: активное окисление SiC начинается при его минимальном давлении, для окисления ZrB_2 требуется увеличение парциального давления кислорода p_{O_2}

приблизительно на два порядка, а для окисления графита – его максимальный показатель. Анализируя структуру окисленного слоя и данные о кинетике роста его толщины, авторы работы [22] обнаружили зону перехода от пассивного к активному окислению SiC при $p_{O_2} < 1500$ Па и температуре 1800 °С. Таким образом, при введении графена в ККМ системы ZrB₂-SiC в случае окисления при атмосферном давлении и температурах ~1500 °С следует ожидать увеличения толщины слоя, обедненного SiC. В случае окисления при более высоких температурах и при пониженном давлении кислорода вполне вероятен переход к активному окислению карбида кремния на поверхности. Графен при этом может замедлить общее окисление из-за локального обогащения CO.

Результаты, полученные в данном исследовании, свидетельствуют о перспективности и целесообразности введения графена в ККМ с целью интенсификации процесса спекания, улучшения свойств и связывания остаточного кислорода. Таким образом, исследования в данном направлении необходимо продолжать.

Заключения

Методом горячего прессования получены образцы из ККМ системы ZrB₂-SiC и проведено исследование влияния содержания графена на их физико-механические свойства и стойкость к окислению. Введение графена в количестве 1–2 % (объемн.) привело к увеличению микротвердости ККМ системы ZrB₂-SiC на 6,8 % (с 24,8 до 26,5 ГПа), снижению открытой пористости на 75 % (с 0,8 до 0,2 %) и увеличению стойкости к окислению при температуре 1500 °С на 63 % (изменение массы уменьшилось с 1,21 до 0,45 %).

Проведено исследование структуры графена с гексагональной кристаллической решеткой методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии, результаты которого свидетельствуют о том, что графен имеет чешуйчатую осколочную структуру с размером агломератов от 1 до 8 мкм.

Исследование микроструктуры полученных образцов из ККМ системы ZrB₂-SiC показало, что образцы имеют матрицу на основе диборида циркония, армированную карбидом кремния. В керамическом композите борид циркония равномерно распределен по всему объему матрицы, а в ККМ с графеном частицы графена при спекании локализовались в отдельные области, неравномерно распределившиеся по объему матрицы.

Список источников

1. Yumin A., Xianghong X., Kaixuan G. Effect of SiC whiskers and graphene nanosheets on the mechanical Properties of ZrB₂-SiC_w-Graphene ceramic composites // *Ceramic international*. 2016. Vol. 42. Is. 12. P. 14066–14070.
2. Nguyen V.-H., Delbari S.A., Shahedi Asl M. et al. Mohammadreza Shokouhimehr Combined role of SiC whiskers and graphene nano-platelets on the microstructure of spark plasma sintered ZrB₂ ceramics // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. P. 12459–12466.
3. Cheng Y., Hu P., Zhou Sh. et al. Using macroporous graphene networks to toughen ZrC-SiC ceramic // *Journal of the European Ceramic Society*. 2018. Vol. 38. Is. 11. P. 3752–3758.
4. Balak Z., Azizieh M., Kafashan H. Optimization of effective parameters on thermal shock resistance of ZrB₂-SiC-based composites prepared by SPS: using Taguchi design // *Materials Chemistry and Physics*. 2017. Vol. 196. P. 333–3340.
5. Vafa N.P., Nayebi B., Shahedi Asl M. Reactive hot pressing of ZrB₂-based composites with changes in ZrO₂/SiC ratio and sintering conditions. Part II: mechanical behavior // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. No. 2. P. 2724–2733.
6. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Высокотемпературные конструкционные композиционные материалы на основе стекла и керамики для перспективных изделий авиационной техники // *Стекло и керамика*. 2012. № 4. С. 7–11.

7. Shahedi Asl M., Farahbakhsh I., Nayebi B. Characteristics of multi-walled carbon nanotube toughened ZrB_2 -SiC ceramic composite prepared by hot pressing // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. Is. 1. P. 1950–1958.
8. Севастьянов В.Г., Симоненко Е.П., Симоненко Н.П., Гращенков Д.В., Солнцев С.Ст., Ермакова Г.В., Прокопченко Г.М., Каблов Е.Н., Кузнецов Н.Т. Получение нитевидных кристаллов карбида кремния с применением золь-гель метода в объеме SiC-керамики // *Композиты и наноструктуры*. 2014. Т. 6. № 4. С. 198–211.
9. Кузнецов Б.Ю., Сорокин О.Ю., Ваганова М.Л., Осин И.В. Синтез модельных высокотемпературных керамических матриц методом искрового плазменного спекания и изучение их свойств для получения композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 4 (53). С. 37–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-37-44.
10. Беляченков И.О., Щеголева Н.Е., Чайникова А.С., Ваганова М.Л., Шавнев А.А. Влияние спекающих и модифицирующих добавок на процесс спекания и свойства нитридокремниевой керамики // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 70–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-70-78.
11. 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). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.04.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-94-104.
12. Житнюк С.В. Бескислородные керамические материалы для аэрокосмической техники (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2018. № 8 (68). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.04.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88.
13. Каблов Е.Н. Инновационные разработки 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: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
14. Wang X., Zhao J., Cui E. et al. Nano/microstructures and mechanical properties of Al_2O_3 -WC-TiC ceramic composites incorporating graphene with different sizes // *Materials Science & Engineering A*. 2021. Vol. 812. Art. 141132.
15. Ahmad I., Islam M., Habis N.A., Parves S. Hot-pressed graphene nanoplatelets or/and zirconia reinforced hybrid alumina nanocomposites with improved toughness and mechanical characteristics // *Journal Materials Science and Technology*. 2020. Vol. 40. P. 135–145.
16. Feng Y.H., Fang J.H., Wu J. et al. Mechanical and tribological properties of plasma sprayed graphene nanosheets/ Al_2O_3 + 13 % TiO_2 composite coating // *Tribology International*. 2020. No. 146. Art. 106233.
17. Li Z.L., Zhao J., Sun J.L. Reinforcement of Al_2O_3 /TiC ceramic tool material by multi-layer graphene // *Ceramic International*. 2017. Vol. 43. P. 11421–11427.
18. Wang X.C., Zhao J., Cui E.Z. Microstructure, mechanical properties and toughening mechanisms of graphene reinforced Al_2O_3 -WC-TiC composite ceramic tool material // *Ceramic International*. 2019. Vol. 45. P. 10321–10329.
19. Liu Y.Z., Jiang X.S., Shi J.L. Research on the interface properties and strengthening-toughening mechanism of nanocarbon-toughened ceramic matrix composites // *Nanotechnology Reviews*. 2020. Vol. 9. P. 190–208.
20. Sun J.L., Zhao J., Huang Z.F. Preparation and properties of multilayer graphene reinforced binderless TiC nanocomposite cemented carbide through twostep sintering // *Materials & Design*. 2020. No. 188. Art. 108495.
21. Rezaie A., Fahrenholtz W.G., Hilmas G.E. The effect of a graphite addition on oxidation of ZrB_2 -SiC in air at 1500 °C // *Journal of European Ceramic Society*. 2013. Vol. 33. P. 413–421.
22. Jin H., Meng S., Xinghong Z. et al. Oxidation of ZrB_2 -SiC-Graphite composites under low oxygen partial pressures of 500 and 1500 Pa at 1800 °C // *Journal of American Ceramic Society*. 2016. Vol. 99. P. 2474–2480.

References

1. Yumin A., Xianghong X., Kaixuan G. Effect of SiC whiskers and graphene nanosheets on the mechanical Properties of ZrB₂-SiC_w-Graphene ceramic composites. *Ceramic international*, 2016, vol. 42, is. 12, pp. 14066–14070.
2. Nguyen V.-H., Delbari S.A., Shahedi Asl M. et al. Mohammadreza Shokouhimehr Combined role of SiC whiskers and graphene nano-platelets on the microstructure of spark plasma sintered ZrB₂ ceramics. *Ceramics International*, 2021, vol. 47, pp. 12459–12466.
3. Cheng Y., Hu P., Zhou Sh. et al. Using macroporous graphene networks to toughen ZrC-SiC ceramic. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, vol. 38, is. 11, pp. 3752–3758.
4. Balak Z., Azizieh M., Kafashan H. Optimization of effective parameters on thermal shock resistance of ZrB₂-SiC-based composites prepared by SPS: using Taguchi design. *Materials Chemistry and Physics*, 2017, vol. 196, pp. 333–3340.
5. Vafa N.P., Nayebi B., Shahedi Asl M. Reactive hot pressing of ZrB₂-based composites with changes in ZrO₂/SiC ratio and sintering conditions. Part II: mechanical behavior. *Ceramics International*, 2016, vol. 42, no. 2, pp. 2724–2733.
6. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.S., Sevastyanov V.G. High-temperature structural composite materials based on glass and ceramics for promising aircraft products. *Steklo i keramika*, 2012, no. 4, pp. 7–11.
7. Shahedi Asl M., Farahbakhsh I., Nayebi B. Characteristics of multi-walled carbon nanotube toughened ZrB₂-SiC ceramic composite prepared by hot pressing. *Ceramics International*, 2016, vol. 42, is. 1, pp. 1950–1958.
8. Sevastyanov V.G., Simonenko E.P., Simonenko N.P., Grashchenkov D.V., Solntsev S.St., Ermakova G.V., Prokopchenko G.M., Kablov E.N., Kuznetsov N.T. Obtaining filamentous silicon carbide crystals using the method of the method in the volume of sic-curamika. *Kompozity i nanostruktury*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 198–211.
9. Kuznetsov B.Yu., Sorokin O.Yu., Vaganova M.L., Osin I.V. Synthesis of model high-temperature ceramic matrices by the method of spark plasma sintering and the study of their properties for the production of composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 37–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-37-44.
10. Belyachenkov I.O., Schegoleva N.E., Chainikova A.S., Vaganova M.L., Shavnev A.A. The influence of sintering and modifying additives on the sintering process and the properties of silicon nitride ceramics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 70–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-70-78.
11. 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), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 07, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-94-104.
12. Zhitnyuk S.V. Oxygen-free ceramic materials for the space technics (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 8 (68), paper no. 8. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 07, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88.
13. 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: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
14. Wang X., Zhao J., Cui E. et al. Nano/microstructures and mechanical properties of Al₂O₃-WC-TiC ceramic composites incorporating graphene with different sizes. *Materials Science & Engineering A*, 2021, vol. 812, art. 141132.
15. Ahmad I., Islam M., Habis N.A., Parves S. Hot-pressed graphene nanoplatelets or/and zirconia reinforced hybrid alumina nanocomposites with improved toughness and mechanical characteristics. *Journal Materials Science and Technology*, 2020, vol. 40, pp. 135–145.
16. Feng Y.H., Fang J.H., Wu J. et al. Mechanical and tribological properties of plasma sprayed graphene nanosheets/Al₂O₃ + 13 % TiO₂ composite coating. *Tribology International*, 2020, no. 146, art. 106233.

17. Li Z.L., Zhao J., Sun J.L. Reinforcement of Al₂O₃/TiC ceramic tool material by multi-layer graphene. *Ceramic International*, 2017, vol. 43, pp. 11421–11427.
18. Wang X.C., Zhao J., Cui E.Z. Microstructure, mechanical properties and toughening mechanisms of graphene reinforced Al₂O₃–WC–TiC composite ceramic tool material. *Ceramic International*, 2019, vol. 45, pp. 10321–10329.
19. Liu Y.Z., Jiang X.S., Shi J.L. Research on the interface properties and strengthening-toughening mechanism of nanocarbon-toughened ceramic matrix composites. *Nanotechnology Reviews*, 2020, vol. 9, pp. 190–208.
20. Sun J.L., Zhao J., Huang Z.F. Preparation and properties of multilayer graphene reinforced binderless TiC nanocomposite cemented carbide through twostep sintering. *Materials & Design*, 2020, no. 188, art. 108495.
21. Rezaie A., Fahrenholtz W.G., Hilmas G.E. The effect of a graphite addition on oxidation of ZrB₂–SiC in air at 1500 °C. *Journal of European Ceramic Society*, 2013, vol. 33, pp. 413–421.
22. Jin H., Meng S., Xinghong Z. et al. Oxidation of ZrB₂–SiC–Graphite composites under low oxygen partial pressures of 500 and 1500 Pa at 1800 °C. *Journal of American Ceramic Society*, 2016, vol. 99, pp. 2474–2480.

Информация об авторах

Лебедева Юлия Евгеньевна, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Щеголева Наталья Евгеньевна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Гуляев Артем Игоревич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Турченко Максим Витальевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Yulia E. Lebedeva, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalia E. Shchegoleva, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Artem I. Gulyaev, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maxim V. Turchenko, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 04.05.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.05.2022.
The article was submitted 04.05.2022; approved and accepted for publication after reviewing 12.05.2022.