

Научная статья

УДК 666.3.019

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-67-75

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АРМИРОВАННОГО РЕАКЦИОННО-СПЕЧЕННОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

О.Ю. Сорокин<sup>1</sup>, И.О. Беляченков<sup>1</sup>, И.В. Осин<sup>1</sup>, А.Н. Головков<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.** Приведены результаты неразрушающего контроля изделий из армированного реакционно-спеченного карбида кремния после механической обработки карбонизованной и силицированной заготовок. Показано, что визуально-оптический и капиллярный методы позволяют обнаружить на поверхности заготовок дефекты в виде пор и трещин. Наиболее часто дефекты появляются на заготовках типов 1 и 2 после проведения фрезерных работ. Протяженные линейные индикации, характерные для трещин, не обнаружены на заготовках типа 3, подвергшихся только пескоструйной обработке и шлифованию.

**Ключевые слова:** реакционно-спеченный карбид кремния, армирование, механическая обработка, капиллярный и визуально-оптический неразрушающий контроль

**Для цитирования:** Сорокин О.Ю., Беляченков И.О., Осин И.В., Головков А.Н. Неразрушающий контроль изделий из армированного реакционно-спеченного карбида кремния на различных стадиях механической обработки // Труды ВИАМ. 2024. № 2 (132). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-67-75.

Scientific article

## NONDESTRUCTIVE CONTROL OF REACTION-BONDED SILICON CARBIDE COMPONENTS AT VARIOUS MACHINING STAGES

O.Yu. Sorokin<sup>1</sup>, I.O. Belyachenkov<sup>1</sup>, I.V. Osin<sup>1</sup>, A.N. Golovkov<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 results obtained via the nondestructive evaluation of reaction-bonded silicon carbide components after the machining of carbonized and siliconized bodies are presented. It was shown that visual-optical and capillary tests are capable to detect the surface defects such as pores and cracks. More often the defects appear on type 1 and 2 components after milling. Extended linear indications, which are common for cracks, were not detected on type 3 components after having been sandblasted and grinded.

**Keywords:** reaction-bonded silicon carbide, reinforcement, mechanical processing, capillary and visual-optical nondestructive control

**For citation:** Sorokin O.Yu., Belyachenkov I.O., Osin I.V., Golovkov A.N. Nondestructive control of reaction-bonded silicon carbide components at various machining stages. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-67-75.

### Введение

Изделия на основе карбида кремния находят широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря высоким значениям таких характеристик, как коррозионная и эрозионная стойкость, твердость, модуль упругости, жаропрочность, жаростойкость, а также низкому уровню плотности и коэффициента трения. При этом карбид кремния характеризуется низким значением критического коэффициента интенсивности напряжений ( $K_{Ic} = 3\text{--}5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ), что ограничивает применение изделий на его основе в условиях воздействия значительных динамических нагрузок. Повысить трещиностойкость (ударную вязкость) материала можно за счет армирования карбидокремниевой матрицы порошками тугоплавких соединений, непрерывными/рублеными волокнами (например, углеродными, карбидокремниевыми), нитевидными кристаллами и др. [1, 2]. Однако применение армирующего наполнителя, как правило, приводит к значительному увеличению продолжительности технологического процесса и, как следствие, конечной стоимости изделий.

В ряде случаев при выборе подходящего материала из SiC, например, для изготовления карбидокремниевых изделий антифрикционного назначения особое внимание уделяют возможности изготовления крупногабаритных/сложнопрофильных деталей, механической обрабатываемости материала, конечной стоимости.

В этой связи представляет интерес метод реакционного спекания. Суть метода заключается в предварительном формовании «зеленой» заготовки из порошков карбида кремния, углеродного наполнителя и полимерного связующего с последующим проведением процессов карбонизации и пропитки (жидкофазного силицирования) пористой углеродкарбидокремниевой заготовки расплавом кремния.

Изделия, полученные из реакционно-спекенного карбида кремния (РСКК), имеют ряд преимуществ перед другими видами карбидокремниевой керамики, а именно:

- возможность изготовления крупногабаритных изделий, размеры которых ограничены только габаритами рабочей камеры печи силицирования. В ряде случаев крупногабаритные/сложнопрофильные изделия также можно изготовить с помощью реакционной пайки элементов более простых форм [3]. Широкие возможности предоставляют аддитивные технологии, позволяющие получить изделия из РСКК, которые невозможно изготовить другими методами формования «зеленой» заготовки. В качестве примеров крупногабаритных/сложнопрофильных изделий из РСКК можно привести пеналы для хранения (захоронения) отходов ядерного топлива, облегченные зеркала для космических телескопов, подшипники скольжения главного циркуляционного насоса перспективных реакторных установок, теплообменники и др. [4–8];

- отсутствие значительной усадки при карбонизации и минимальное изменение габаритов «зеленой» заготовки при жидкофазном силицировании позволяют проводить формование с минимальным припуском на механическую обработку, что в значительной степени снижает расход алмазного инструмента;

- возможность организации серийного выпуска изделий из РСКК значительно снижает их стоимость. В качестве наглядного примера успешной организации такого производства можно привести изготовление компанией General Electric деталей газотурбинного двигателя из керамического композиционного материала класса SiC/SiC, в котором карбидокремниевая матрица формируется именно при жидкофазном силицировании [9].

Накопленный авторами данной статьи опыт по изготовлению изделий из РСКК подтверждает, что вероятность появления дефектов и, как следствие, формирование стоимости готового изделия зависят от качества механической обработки на стадии

получения как карбонизованной, так и силицированной заготовок. Ранее отмечено, что некоторые виды дефектов в виде трещин, отдельных пор или их скоплений необходимо тщательно отслеживать на отдельных стадиях технологического процесса изготовления изделий на основе карбида кремния [10–14].

Качество продукции можно эффективно контролировать, используя различные методы неразрушающего контроля, позволяющие выявлять несплошности материала как находящиеся внутри заготовки, так и имеющие выход на ее поверхность.

Наибольшее влияние на качество готовой продукции оказывают несплошности материала, имеющие выход на поверхность контролируемой продукции. Такие дефекты, как правило, относятся к критическим и требуют максимальной чувствительности при выявлении. Одним из высокочувствительных методов диагностики дефектов является капиллярный метод неразрушающего контроля с использованием люминесцентных проникающих жидкостей, позволяющих выявлять несплошности шириной раскрытия  $\leq 1$  мкм.

Цель данной работы – определение влияния параметров технологического процесса изготовления заготовок и готовых изделий из армированного РСКК, в том числе механической обработки, на качество конечной продукции и разработка комплекса мер по снижению вероятности появления дефектов.

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

### Материалы и методы

Для изготовления изделий из армированного РСКК применяли порошковую многокомпонентную смесь, содержащую порошки SiC (ГОСТ 26327–84), углеродного наполнителя (ГОСТ 7885–86) и синтетического связующего (ГОСТ 18694–2017). Средний размер зерна порошковой многокомпонентной смеси не превышал 100 мкм.

Порошковую многокомпонентную смесь прессовали на гидравлическом прессе при температуре  $\geq 150$  °С и усилии, обеспечивающем максимальное уплотнение заготовок. Пиролиз полученных заготовок проводили при режимах, позволяющих предотвратить растрескивание. Кусковой кремний измельчали на щековой дробилке до размеров не более 20×20 мм. Силицирование пористых углеродкарбидокремниевых заготовок проводили в вакуумной печи методом дождевания при температуре  $>1410$  °С. Данный способ силицирования предусматривает отдельный нагрев кускового кремния и заготовок, прошедших стадию карбонизации.

Наличие внутренних и внешних дефектов оценивали визуально-оптическим и капиллярным методами неразрушающего контроля на заготовках типов 1–3. Заготовка типа 2 отличается от заготовки типа 1 наличием отверстия. Всего изготовлено 36 изделий различных типов.

Неразрушающий контроль капиллярным методом проводили с использованием набора дефектоскопических материалов ЛЮМ 33-ОВ. Метод позволяет выявлять несплошности, которые имеют выход на контролируемую поверхность, с шириной раскрытия, соответствующей I классу чувствительности по ГОСТ 18442–80 ( $\leq 1$  мкм). Данный набор рекомендован к использованию в соответствии с ОСТ 1 90282–79 и обладает пониженной токсичностью и пожароопасностью.

В состав набора дефектоскопических материалов ЛЮМ 33-ОВ входят индикаторный пенетрант ЛЖ-18НВ (ТУ 2662-010-73057924), очищающая жидкость ОЖ-7А (ТУ 2662-009-73057924) и проявитель ПР-15А (ТУ 2662-011-73057924).

Работоспособность набора дефектоскопических материалов ЛЮМ 34-В проверяли на контрольном образце с искусственными дефектами с шириной раскрытия, соответствующей заявленному классу чувствительности набора дефектоскопических материалов (II класс чувствительности по ГОСТ 18442–80). При проверке на контрольном образце выявлены все дефекты. Индикация выражена ярким желто-зеленым свечением. Фон, мешающий разбраковке, отсутствует. Полученный результат подтверждает, что набор дефектоскопических материалов соответствует требованиям технической документации и пригоден для контроля.

Технологические режимы контроля соответствовали приведенным в ОСТ 1 90282–79.

### Результаты и обсуждение

Одной из наиболее ответственных стадий технологического процесса получения изделий из армированного РСКК является механическая обработка заготовки. Традиционно для снижения объема работ по механической обработке и снижению расхода алмазного инструмента профиль «зеленой» заготовки получают максимально приближенным к конечному изделию, при этом припуск определяется усадкой при карбонизации. На численное значение усадки влияют несколько параметров, основными из которых являются количество и тип связующего, гранулометрический состав шихты для прессования, технологические параметры процесса карбонизации и др.

Длина и ширина «зеленой» заготовки типа 1 превышала соответствующие размеры заготовок, прошедших стадии карбонизации и силицирования (рис. 1). Среднее значение усадки заготовки после карбонизации по длине и ширине составило  $2,8 \pm 0,2$  %, по высоте  $1,8 \pm 0,3$  %. Следует отметить, что габаритные размеры силицированной и карбонизованной заготовок отличаются не более чем на  $\pm 0,2$  %, поэтому механическая обработка карбонизованной заготовки включает выточку «под размер» пазов, ступенек, отверстий, канавок и т. д.

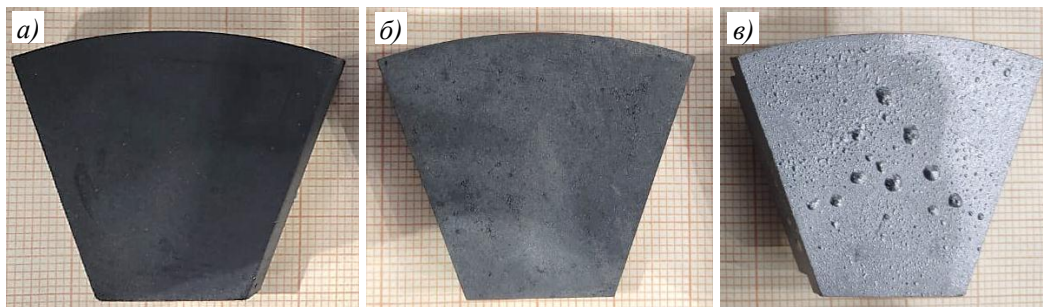


Рис. 1. Внешний вид заготовки типа 1 после прессования (а), карбонизации (б) и силицирования (в)

Визуально-оптический анализ внешней поверхности механически обработанных «под размер» карбонизованных заготовок всех типов видимых дефектов не выявил. При этом на одной из заготовок типа 2 (заготовка № 36) в области сквозного отверстия отмечены четыре радиальные трещины длиной от 5 до 11 мм, образовавшиеся в процессе сверления. Для документирования процесса эволюции трещин в результате проведения последующих технологических операций данную заготовку не отбраковали, а вместе с остальными подвергли силицированию.

Пропитанные расплавом кремния заготовки типа 1 и 2 подвергали механической обработке алмазным инструментом на пятиосевом фрезерном станке с числовым

программным управлением, заготовки типа 3 – только пескоструйной обработке для удаления наплывов кремния. Рабочие поверхности заготовок всех типов шлифовали алмазным кругом на плоскошлифовальном станке до получения степени чистоты поверхности не ниже  $R_a = 0,4$  мкм.

Далее изделия проходили неразрушающий контроль капиллярным методом. Внешний вид изделий под УФ-излучением представлен на рис. 2. Установлено, что на контролируемых рабочих поверхностях присутствуют множественные индикаторные следы округлой формы с ярким свечением желто-зеленого цвета.

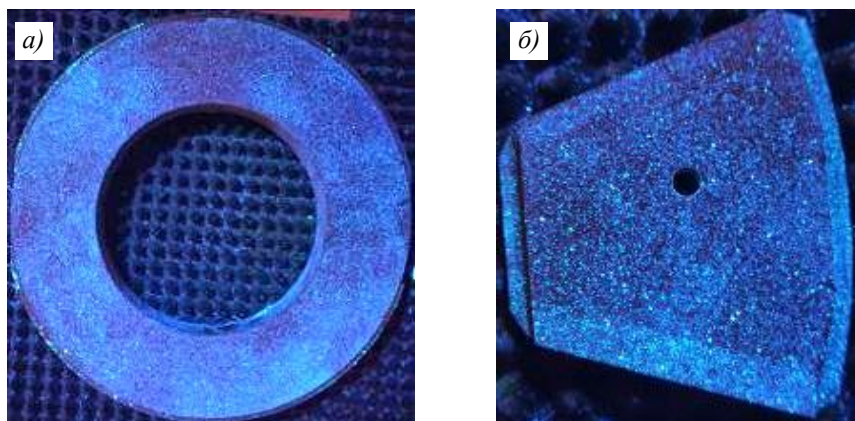


Рис. 2. Внешний вид силицированных изделий типа 3 (а) и 2 (б) под УФ-излучением

Индикаторные следы на поверхности силицированных изделий указывают на наличие пористых углеродных включений, выполняющих роль твердой смазки, а также формирующих специальную гетеромодульную микроструктуру РСКК.

В отличие от микроструктуры мелкозернистого силицированного графита и РСКК, содержащего равномерно распределенные по всему объему материала микрочастицы искусственного графита, в армированном РСКК углеродные включения расположены в определенном порядке, образующем области с резко отличающимися значениями модуля упругости [11–13]. Данная микроструктура материала способствует повышению ударной вязкости за счет реализации механизма Кука–Гордона до значения  $K_{Ic} \geq 6$  МПа $\sqrt{м}$ , а также увеличению стойкости к циклическим воздействиям и резким теплосменам, что хорошо согласуется с работами других авторов на примере керамических композиционных материалов составов  $ZrB_2-SiC-hBN$ ,  $SiC/C$ ,  $Si_3N_4/BN$  и др. [14–18].

Анализ результатов неразрушающего контроля также показал наличие на некоторых изделиях протяженных линейных индикаций, характерных для трещин (рис. 3, а).

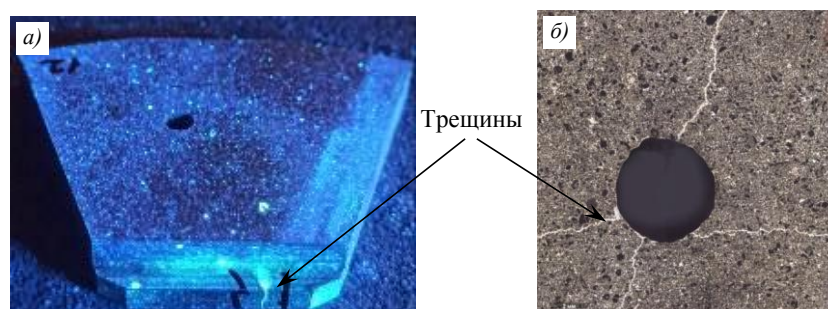


Рис. 3. Внешний вид силицированного изделия типа 2 с трещиной под УФ-излучением (а) и оптическое изображение трещин, заполненных кремнием, у отверстия в заготовке № 36 (б)

Установлено, что частота появления трещин на внешней поверхности изделий типа 1 и 2 практически одинаковая. В ряде случаев обнаружены трещины, не заполненные кремнием. Это указывает на то, что с наибольшей вероятностью они появились после кристаллизации расплава кремния в процессе силицирования (при остывании печи силицирования), а также при фрезеровании силицированных заготовок. Наличие кремния в трещинах (рис. 3, б) подтверждает, что возможной причиной их появления является механическая обработка карбонизованной заготовки, с меньшей вероятностью – нагрев в печи силицирования (до плавления кремния при температуре 1410 °С).

Следует отметить, что длина трещин в заготовке № 36 увеличилась на ~(10–30) % после силицирования, что, по-видимому, связано с расширяющим эффектом, обусловленным увеличением объема Si при кристаллизации на ~10 % [19].

Внешний вид готовых силицированных изделий всех типов после финишной механической обработки представлен на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид механически обработанных силицированных изделий типа 3 (а), 1 и 2 (б)

Наибольшая частота появления внешних дефектов зафиксирована на силицированных заготовках типа 1 и 2 с максимальным объемом фрезерных работ. Протяженные линейные индикации, характерные для дефектов в виде трещин, не обнаружены на силицированных заготовках типа 3, подвергшихся только пескоструйной обработке и шлифованию, несмотря на их значительно больший размер.

### Заключения

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- визуально-оптический и капиллярный методы неразрушающего контроля позволяют гарантированно обнаружить несплошности в виде трещин и пор на поверхности изделий из армированного РСМК и могут быть рекомендованы к внедрению в производственные процессы;
- для снижения вероятности появления дефектов в виде трещин на силицированных изделиях необходимо минимизировать объем фрезерных работ за счет, например, формования изделия с минимальным припуском на усадку.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ А.Ю. Беляеву, Е.А. Белоцерковскому, С.А. Евдокимову, Г.М. Прокопченко, С.В. Житнюку за помощь в подготовке и изготовлении изделий, проведении исследований, обсуждении результатов и ценные замечания.

## Список источников

1. Румянцев В.И., Генусова Т.Н., Сапронов Р.Л., Кожевников А.В. Керамоматричные композиционные материалы для использования в антифрикционных парах трения: современное состояние и перспективы развития // Компрессорная техника и пневматика. 2010. № 8. С. 35–39.
2. Житнюк С.В. Влияние спекающих добавок на свойства керамики на основе карбида кремния (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-79-86.
3. Вашарин С.А., Федоров А.Е., Кочерга Л.Н. Состояние и перспективы применения подшипников скольжения из керамических материалов и твердых сплавов в насосном оборудовании // Материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. «СИНТ-13». Воронеж, 2013. С. 184–191.
4. 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). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-75-83.
5. Кулик В.Н., Нилов А.С., Богачев Е.А. Высокотемпературные неразъемные соединения керамоматричных композиционных материалов, армированных углеродными волокнами, с аналогичными и другими углеродсодержащими материалами // Новые огнеупоры. 2022. № 2. С. 32–44.
6. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Козлов И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяных соединениях, используемых в конструкции двигателей авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
7. Бабаянц Г.И. Пеналы из карбида кремния для изоляции высокоактивных отходов (ВЯО) и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в геологических формациях // Материалы Междунар. форума «Атомэкспо 2014». М., 2014. С. 1–29.
8. Ильющенко А.Ф., Дьячкова Л.Н., Осипов В.А. Сложнопрофильные элементы аэрокосмической техники из реакционноспеченной карбидокремниевой керамики // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2020. Т. 64. № 6. С. 730–738.
9. Corman G.S., Luthra K.L. Development history of GE's prepreg melt infiltrated ceramic matrix composite material and applications // Comprehensive composite materials II. 2017. Vol. 5. P. 325–338.
10. 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). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
11. Бабушкин С.В., Африкантов Г.Г., Новиков С.В., Скулкин Н.Г., Бугреев А.В., Сальников В.Г., Луканов А.В., Порфирьев М.С. Испытания полномасштабного макета осевого подшипника для герметичного ГЦН-2 РУ БН-1200М на воде // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-реакторные константы. 2022. № 3. С. 252–257.
12. Агафонов С.В., Михайлов С.В., Ковеленов Н.Ю. Прогнозирование и управление качеством поверхностного слоя неспеченных керамических заготовок при обработке резанием // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 1 (2). С. 207–210.
13. Кузин В.В., Федоров С.Ю., Григорьев С.Н. Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности SiSiC керамики // Новые огнеупоры. 2017. № 3. С. 179–185.
14. Чайникова А.С., Сорокин О.Ю., Кузнецов Б.Ю., Житнюк С.В., Суворов П.В. Исследование образцов из реакционно-спеченного карбида кремния визуальным-оптическим и радиографическим методами неразрушающего контроля // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 6. С. 46–51.

15. Сорокин О.Ю., Бубненко И.А., Кошелев Ю.И., Орехов Т.В. Разработка мелкозернистого силицированного графита с улучшенными свойствами // Химия и химическая технология. 2012. Т. 55. № 6. С. 12–16.
16. Сорокин О.Ю., Беляченков И.О., Чайникова А.С., Житнюк С.В., Медведев П.Н. Структура и фазовый состав реакционно-спеченного карбида кремния, содержащего искусственный графит // Вопросы материаловедения. 2022. № 3 (111). С. 49–58.
17. Шабалин И.Л. Перспективы нанотехнологии и дизайна материалов на основе тугоплавких соединений // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2018. № 4. С. 73–81.
18. Севостьянова И.Н., Лян Х., Буюкова С.П. Формирование структуры и свойств гетеромодульных многокомпонентных керамических композиционных материалов на основе диборида циркония // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные технологии: сб. докл. Междунар. конф. Томск, 2023. С. 580–581.
19. Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Тягельский П.В. Термические свойства германия и кремния в конденсированном состоянии // Теплофизика высоких температур. 1999. Т. 37. № 4. С. 559–564.

### References

1. Rumyantsev V.I., Genusova T.N., Saprionov R.L., Kozhevnikov A.V. Ceramic matrix composite materials for use in antifriction friction pairs: current state and development prospects. *Kompresornaya tekhnika i pnevmatika*, 2010, no. 8, pp. 35–39.
2. Zhitnyuk S.V. Effect of sintering additives on the properties of silicon carbide-based ceramics (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 01, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-79-86.
3. Vasharin S.A., Fedorov A.E., Kocherga L.N. State and prospects for the use of sliding bearings made of ceramic materials and hard alloys in pumping equipment. *Materials of the VII Int. Sc. and Tech. Conf. «SINT-13»*. Voronezh, 2013, pp. 184–191.
4. 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), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 01, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-75-83.
5. Kulik V.N., Nilov A.S., Bogachev E.A. High-temperature permanent connections of ceramic-matrix composite materials reinforced with carbon fibers with similar and other carbon-containing materials. *Novye ogneupory*, 2022, no. 2, pp. 32–44.
6. Kablov E.N., Kutyrev A.E., Vdovin A.I., Kozlov I.A., Afanasyev-Khodykin A.N. The research of possibility of galvanic corrosion in brazed connections used in aviation engine construction. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 24, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
7. Babayants G.I. Silicon carbide canisters for isolating high-level waste (HLW) and spent nuclear fuel (SNF) in geological formations. *Materials of the Int. forum «Atomexpo 2014»*. Moscow, 2014, pp. 1–29.
8. Ilyushchenko A.F., Dyachkova L.N., Osipov V.A. Complex-profile elements of aerospace technology made of reaction-sintered silicon carbide ceramics. *Doklady Natsionalnoy akademii nauk Belarusi*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 730–738.
9. Corman G.S., Luthra K.L. Development history of GE's prepreg melt infiltrated ceramic matrix composite material and applications. *Comprehensive composite materials II*, 2017, vol. 5, pp. 325–338.
10. 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), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 24, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.

11. Babushkin S.V., Afrikantov G.G., Novikov S.V., Skulkin N.G., Bugreev A.V., Salnikov V.G., Lukanov A.V., Porfiryev M.S. Testing of a full-scale mock-up of an axial bearing for the sealed MCP-2 reactor BN-1200M on water. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser.: Yaderno-reaktornyye konstanty*, 2022, no. 3, pp. 252–257.
12. Agafonov S.V., Mikhailov S.V., Kovelonov N.Yu. Prediction and quality control of the surface layer of unsintered ceramic workpieces during cutting. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2017, vol. 19, no. 1 (2), pp. 207–210.
13. Kuzin V.V., Fedorov S.Yu., Grigoriev S.N. Relationship between diamond grinding modes and the state of the surface of SiSiC ceramics. *Novye ognepory*, 2017, no. 3, pp. 179–185.
14. Chainikova A.S., Sorokin O.Yu., Kuznetsov B.Yu., Zhitnyuk S.V., Suvorov P.V. Study of samples from reaction-sintered silicon carbide by visual-optical and radiographic methods of non-destructive testing. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2022, vol. 88, no. 6, pp. 46–51.
15. Sorokin O.Yu., Bubnenkov I.A., Koshelev Yu.I., Orekhov T.V. Development of fine-grained siliconized graphite with improved properties. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2012, vol. 55, no. 6, pp. 12–16.
16. Sorokin O.Yu., Belyachenkov I.O., Chainikova A.S., Zhitnyuk S.V., Medvedev P.N. Structure and phase composition of reaction-sintered silicon carbide containing artificial graphite. *Voprosy materialovedeniya*, 2022, no. 3 (111), pp. 49–58.
17. Shabalin I.L. Prospects for nanotechnology and design of materials based on refractory compounds. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya*, 2018, no. 4, pp. 73–81.
18. Sevostyanova I.N., Liang H., Buyakova S.P. Formation of the structure and properties of heteromodular multicomponent ceramic composite materials based on zirconium diboride. *Physical mesomechanics. Materials with a multi-level hierarchically organized structure and intelligent technologies: reports Int. conf. Tomsk, 2023*, pp. 580–581.
19. Stankus S.V., Khairulin R.A., Tyagelsky P.V. Thermal properties of germanium and silicon in a condensed state. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 1999, vol. 37, no. 4, pp. 559–564.

#### Информация об авторах

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

**Беляченков Иван Олегович**, начальник участка, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Осин Иван Валентинович**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Головков Алексей Николаевич**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

#### Information about the authors

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

**Ivan O. Belyachenkov**, Head of production area, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Ivan V. Osin**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Alexey N. Golovkov**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 25.01.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 01.02.2024.  
The article was submitted 25.01.2024; approved and accepted for publication after reviewing 01.02.2024.