

Научная статья
УДК 666.3:666.792.3:666.792.5
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.046

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ РЕАКЦИОННОМ СПЕКАНИИ TiB_2 И TiC

Алина Дмитриевна Быкова

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» — Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», Санкт-Петербург, Россия, bykova.ad@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-4276-5576>

Аннотация

Экспериментально определено, что в результате реакционного спекания керамических материалов из мелкодисперсных порошков в формируемой неравновесной системе TiB_2 – SiC – C – Si синтезируется стабильная функциональная матрица на основе SiC – TiB_2 . Физико-механические характеристики опытного материала на образцах: $\sigma_{изг}$ — 415 МПа, E — 310 ГПа, HV — 21 ГПа. В результате реакционного спекания керамических материалов из мелкодисперсных порошков в формируемой неравновесной системе TiC – SiC – C – Si синтезируется нестабильная функциональная матрица на основе SiC – TiC с охрупчивающими побочными соединениями — силицидами титана. Физико-механические характеристики опытного материала на образцах: $\sigma_{изг}$ — 130 МПа, E — 300 ГПа, HV — 21 ГПа.

Ключевые слова:

керамика, реакционное спекание, карбид титана, диборид титана, карбид кремния, углерод, композиционный материал, силицирование

Благодарности:

статья выполнена при поддержке Российского научного фонда (Соглашение № 21-73-30019-П).

Финансирование:

грант Российского научного фонда (Соглашение № 21-73-30019-П).

Для цитирования:

Быкова А. Д. Исследование фазовых превращений при реакционном спекании TiB_2 и TiC // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 1. С. 262–267. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.046.

Original article

STUDY OF PHASE TRANSFORMATIONS DURING REACTION SINTERING OF TiB_2 AND TiC

Alina D. Bykova

NRC "Kurchatov Institute"—CRISM "Prometey", Saint Petersburg, Russia, bykova.ad@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-4276-5576>

Abstract

Experimental results demonstrate that reactive sintering of fine ceramic powders in the nonequilibrium TiB_2 – SiC – C – Si system yields a stable functional SiC – TiB_2 matrix. The synthesized material exhibits the following mechanical properties: flexural strength (σ) = 415 MPa, Young's modulus (E) = 310 GPa, Vickers hardness (HV) = 21 GPa. Conversely, reactive sintering in the TiC – SiC – C – Si system produces an unstable SiC – TiC matrix with embrittling secondary phases—titanium silicides. Mechanical testing reveals degraded performance: flexural strength (σ) = 130 MPa, Young's modulus (E) = 300 GPa, Vickers hardness (HV) = 21 GPa.

Keywords:

ceramics, reaction sintering, titanium carbide, titanium diboride, silicon carbide, carbon, composite material, siliconizing

Acknowledgments:

The article was prepared with the support of the Russian Science Foundation (Agreement No. 21-73-30019-P).

Funding:

Grant from the Russian Science Foundation (Agreement No. 21-73-30019-P).

For citation:

Bykova A. D. Study of phase transformations during reaction sintering of TiB_2 and TiC // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 262–267. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.046.

Введение

Карбид кремния широко используется в современной промышленности благодаря сочетанию комплекса таких свойств, как низкая плотность, высокая прочность и твердость, окислительная стойкость, высокая теплопроводность, низкий коэффициент теплового расширения, сохранение прочности при высоких температурах [1–7]. При температуре 1 200 °С в условиях воздействия воздуха карбид

кремния образует защитное оксидное покрытие и может повысить свою жаропрочность до 1 400 °С [8]. С другой стороны, низкая трещиностойкость карбида кремния делает его чувствительным к дефектам и ограничивает сферу его применения [9; 10].

Известно, что введение тугоплавких боридов и карбидов переходных металлов в качестве упрочняющих фаз может повысить функциональные свойства карбидокремниевой керамики. Например, введение упрочняющих фаз, играющих роль дефлекторов трещин, может повысить коэффициент трещиностойкости матрицы карбида кремния [11–13]. В работе [14] горячим прессованием получен карбид кремния, армированный карбидом титана, что позволило существенным образом повысить трещиностойкость композиционного материала (в 1,5 раза), в статье [15] отмечается, что синтез диборида титана непосредственно в матрице карбида кремния подавляет рост зерен, что эффективно сказывается на получаемых физико-механических характеристиках. В доступной научной литературе представлено много информации о влиянии различных методов спекания (горячее прессование, искровое плазменное спекание, жидкофазное спекание) на функциональные свойства композитов SiC–TiB₂ и SiC–TiC, что отражено в обзорной статье [16]. Однако отсутствует системная информация по получению керамических композитов на основе карбида кремния с модифицирующими компонентами при реализации метода реакционного спекания отформованных композиционных порошков. Ввиду широкого применения карбида кремния и потенциальных перспектив его развития в присутствии вторых фаз, в том числе таких, как TiB₂ и TiC, перспективным направлением является получение керамических композитов SiC–TiC и SiC–TiB₂ методом реакционного спекания (силицирования) и исследование их физико-механических свойств.

Цель данной работы — изучение аспектов фазовых превращений в реакционно-спеченных материалах на основе диборида и карбида титана из мелкодисперсных порошков для оценки реакционной активности данных соединений титана и дальнейшей оценки перспектив получения функциональных композиционных матриц SiC–TiB₂ и SiC–TiC.

Результаты

В результате прессования шихты на основе мелкодисперсных порошков TiB₂ и TiC (фракция 1–2 мкм) с добавлением технической сажи (марка К-354), а также фенольной смолы в качестве пластификатора пористость формируемых заготовок составила порядка 48–52 % об. В процессе термообработки расплав кремния пропитывал прессованную заготовку, проходя по поровым каналам и реагируя с углеродным компонентом, при этом осуществлялось образование зародышей карбида кремния с их последующим прорастанием на поверхности исходных боридных и карбидных частиц, что обеспечивало связывание тугоплавкой матрицы в монолитный материал, в соответствии с концепцией реакционного спекания карбидокремниевых материалов [17–24].

Согласно литературным данным [11], химическое взаимодействие кремния и углерода начинается на границе раздела фаз уже при температуре порядка 1 200 °С и становится более интенсивным при температуре выше 1 414 °С, что соответствует началу плавления кремния. Образование жидкой фазы может существенно ускорять реакционную способность. Зерна карбида кремния образуются при насыщении кремниевого расплава углеродом. Заполнение объема пор заготовки карбидом кремния по реакционному механизму характеризуется формированием плотного монолитного керамического материала с относительной плотностью не менее 99 % [17; 23]. Для более детальной оценки фазовых взаимодействий реакционно-спеченных керамик на основе диборида и карбида титана был определен фазовый состав поверхности образцов после термообработки, результаты представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, в обоих керамических материалах присутствует фаза карбида кремния как основного продукта реакционного спекания, данный факт связан с обеспечением смачиваемости титановых тугоплавких соединений расплавом кремния (наличие объемного реакционного взаимодействия). Следует также отметить отсутствие модификаций углерода, что говорит о полном его расходе на реакцию силицирования. Наличие в материалах кремниевой составляющей может быть связано с кристаллизацией жидкой фазы в поровых пространствах спекаемых керамик. Необходимо добавить, что пористость заготовок реакционно-спекаемых материалов из карбидокремниевых порошков при идентичном содержании углерода и давлении прессования 100 МПа несколько ниже

(порядка 30–35 % об., за счет использования уплотняемых разнофракционных составов) [21]. Наличие более высокой пористости заготовок в экспериментальном синтезе с большой долей вероятности приводит к повышению объемного содержания непрореагировавшего кремния в композиционных материалах.

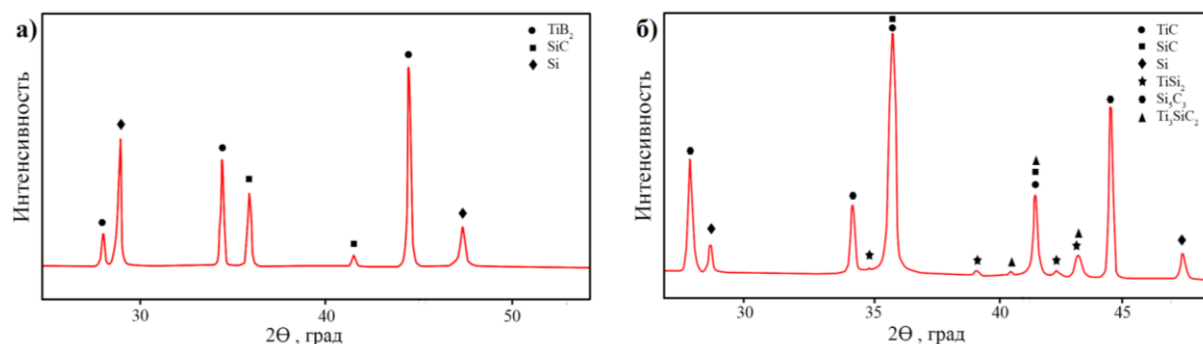


Рис. 1. Дифрактограммы реакционно-спеченных керамик из мелкодисперсных порошков TiB_2 (а) и TiC (б)

Однако в процессе реакционного спекания мы можем наблюдать принципиально различный характер фазовых взаимодействий в неравновесной многокомпонентной системе $\text{TiB}_2(\text{TiC})\text{--SiC--C--Si}$, реакционная способность которой определяется кинетическими особенностями, а именно распределением исходных компонентов относительно друг друга (влияние интенсивности перемешивания порошков), соотношением скорости образования продуктов реакции к изменению концентрации компонентов в объеме с учетом пропитки кремниевым расплавом. Из работ научной группы профессора С. С. Орданьяна [25] известно, что тугоплавкие соединения титана образуют эвтектические системы с карбидом кремния. В частности, температура плавления $T_{\text{пл}}$ для системы SiC--TiB_2 (при содержании 68 % мол. SiC — 32 % мол. TiB_2) составляет 2 250 °С, для SiC--TiC (при содержании 55 % мол. SiC — 45 % мол. TiC) несколько выше — 2 320 °С. Температура реакционного спекания протекает в более низкой области значений, что позволяет говорить об отсутствии взаимодействия диборида и карбида титана с образующимся в ходе спекания SiC .

На рисунке 2, а можно наблюдать характерную структуру реакционно-спеченного керамического материала на основе диборида титана в поперечном сечении, представленную исходными мелкодисперсными частицами, связанными карбидом кремния. Частицы диборида титана имеют четко выраженные границы, в структуре не наблюдается расслоений и трещин. Отдельные зоны структуры, насыщенные карбидом кремния, могут являться негативным следствием скопления агломератов технической сажи при перемешивании порошков.

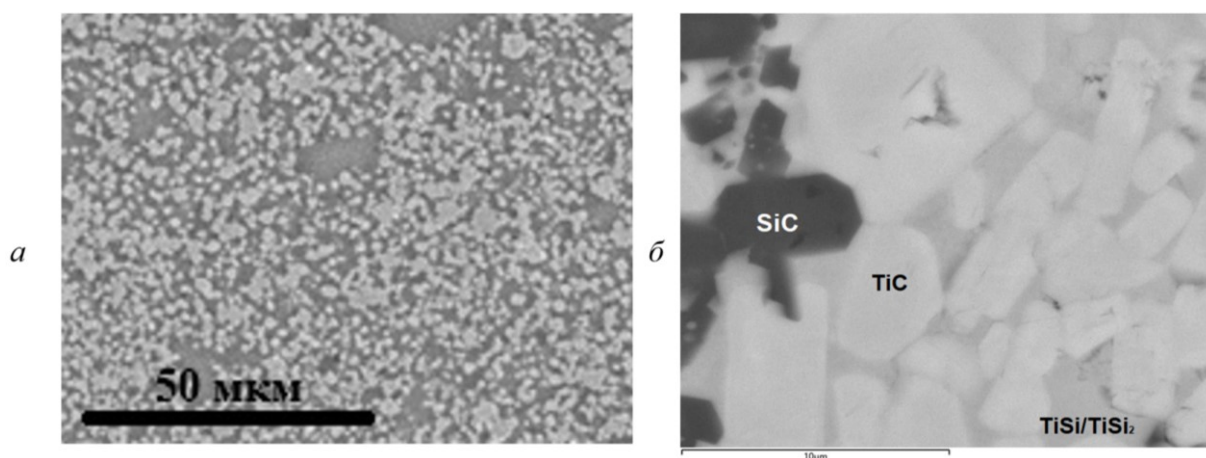


Рис. 2. Структура реакционно-спеченного диборида титана (а) и карбида титана (б)

На рисунке 2, б можно наблюдать отдельный контрастированный участок микроструктуры реакционно-спеченного керамического материала на основе карбида титана. На большом увеличении видно, что между частицами карбида титана идентифицируются светло-серые зоны зёрненного строения, имеющие отличную от карбидокремниевой структуры цветовую гамму. С большой долей вероятности данные зоны являются силицидными соединениями — продуктами частичного распада карбида титана. Ввиду наличия упрочняющих фазовых составляющих и структурной стабильности установлено, что прочностные свойства реакционно-спеченной керамики на основе диборида титана по изгибному критерию (предел прочности на изгиб $\sigma_{изг} = 415$ МПа, модуль упругости $E = 310$ ГПа) существенно выше, чем у керамики на основе карбида титана (предел прочности на изгиб $\sigma_{изг} = 130$ МПа, модуль упругости $E = 300$ ГПа), исходя из усредненных значений по результатам испытаний на серии из пяти образцов (балках) при сопоставимой плотности. Показатели прочности необходимо оценивать с учетом применения порошков однофракционного состава при экспериментальном давлении формования, что требует дальнейшей технологической оптимизации. Интегральная микротвердость HV керамик в межзеренных пространствах титановых тугоплавких соединений составила 21 ГПа, открытая пористость П материалов — 0,5 % об., что характерно для технологии реакционного спекания.

Выводы

Экспериментально определено, что в результате реакционного спекания керамических материалов из мелкодисперсных порошков в формируемой неравновесной системе $TiB_2-SiC-C-Si$ синтезируется стабильная функциональная матрица на основе $SiC-TiB_2$. Физико-механические характеристики опытного материала на образцах: $\sigma_{изг}$ — 415 МПа, E — 310 ГПа, HV — 21 ГПа. Экспериментально определено, что в результате реакционного спекания керамических материалов из мелкодисперсных порошков в формируемой неравновесной системе $TiC-SiC-C-Si$ синтезируется нестабильная функциональная матрица на основе $SiC-TiC$ с охрупчивающими побочными соединениями — силицидами титана. Физико-механические характеристики опытного материала на образцах: $\sigma_{изг}$ — 130 МПа, E — 300 ГПа, HV — 21 ГПа.

Таким образом, результаты практического эксперимента по силицированию керамик продемонстрировали, что композиционный материал на функциональной матрице $SiC-TiB_2$ является наиболее перспективным для оптимизации его применения в машиностроении с целью возможного повышения таких свойств реакционно-спеченных карбидокремниевых керамик, как жаропрочность, трещиностойкость, прочность на изгиб-растяжение-сжатие.

Список источников

1. Ruys A. J. Silicon carbide ceramics structure, properties, and manufacturing. Elsevier, 2023. 585 p.
2. Development of novel ceramic construction materials based on silicon carbide for products of complex geometry / M. A. Markov [et al.] // J. Machinery Manufacture and Reliability. 2021. Vol. 50, no. 2. P. 158–163. doi:10.3103/S1052618821020096.
3. Review article: Silicon carbide. Structure, properties and processing / V. A. Izhevskiy [et al.] // Ceramica. 2000. Vol. 46 (297). P. 4–13. doi:10.1590/S0366-69132000000100002.
4. Contemporary materials and their application in the construction of special engineering high-temperature objects / A. N. Belyakov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. 2024. Vol. 64, no. 3. P. 256–264. doi:10.1007/s11148-024-00835-3.
5. A comparative study of methods for obtaining silicon carbide ceramic materials / A. N. Belyakov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. 2023. Vol. 64, no. 3. P. 299–310. doi:10.1007/s11148-024-00842-4.
6. Study of the structural, physical, and mechanical characteristics of reaction-sintered silicon carbide ceramics / A. N. Belyakov [et al.] // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2023. Vol. 52, Suppl. 1. P. S74–S81. doi:10.3103/S1052618823090029.
7. Chin H., Cheong K., Ismail A. A review on die attach materials for SiC-based high-temperature power devices // Metallurgical and Materials Transactions B. 2010. Vol. 41. P. 824–832. doi:10.1007/s11663-010-9365-5.
8. Markov M. A., Vikhman S. N., Belyakov A. N. High-temperature bending tests of reaction-sintered silicon carbide-based ceramic materials // Russian Journal of Applied Chemistry. 2023. Vol. 96, no. 1. P. 16–20. doi:10.1134/S1070427223010032.
9. Wang W., Lian J., Ru H. Pressureless sintered SiC matrix toughened by in situ synthesized TiB_2 : process conditions and fracture toughness // Ceramics International. 2012. Vol. 38 (3). P. 2079–2085. doi:10.1016/j.ceramint.2011.10.045.

10. Cabrero J., Audubert F., Pailler R. Fabrication and characterization of sintered TiC–SiC composites // J. European Ceramic Society. 2011. Vol. 31, no. 3. P. 313–320. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2010.10.01.
11. Monotonic tension, fatigue and creep behavior of SiC–fiber-reinforced SiC–matrix composites: a review / S. Zhu [et al.] // Composites Science and Technology. 1999. Vol. 59, no. 6. P. 833–851. doi:10.1016/S0266-3538(99)00014-7.
12. Zhang L., Yang H., Guo X. Preparation and properties of silicon carbide ceramics enhanced by TiN nanoparticles and SiC whiskers // Scripta Materialia. 2011. Vol. 65, no. 3. P. 186–189. doi:10.1016/j.scriptamat.2011.03.034.
13. Wei G., Becher P. Improvements in mechanical properties in SiC by addition of TiC particles // J. American Ceramic Society. 1984. Vol. 67, no. 8. P. 571–574. doi:10.1111/j.1151-2916.1984.tb19174.x.
14. Endo H., Ueki M., Kubo H. Microstructure and mechanical properties of hot-pressed SiC–TiC composites // J. Materials Science. 1991. Vol. 26. P. 3769–3774. doi:10.1007/BF01184969.
15. Microstructure and materials properties of SiC–TiB₂ particulate composites / C. McMurtry [et al.] // American Ceramic Society Bulletin. 1987. Vol. 66. P. 325–329.
16. Khodaei M., Yaghobizadeh O., Reza B. Effects of different sintering methods on the properties of SiC–TiC, SiC–TiB₂ composites // Intern. J. refractory metals and hard materials. 2018. Vol. 70. P. 19–31. doi:10.1016/j.jrmhm.2017.09.005.
17. Гаршин А. П., Чулкин С. Г. Реакционно-спеченные карбидокремниевые материалы конструкционного назначения. Физико-механические и триботехнические свойства. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 83 с.
18. Самойлов В. М., Породзинский И. А. Получение и исследование карбидокремниевых материалов на основе реакционносвязанного карбида кремния // Перспективные материалы. 2014. № 3. С. 67–71.
19. Methods of forming geometrically complex manufactured products from silicon-carbide based, heat-resistant, ceramic materials / M. A. Markov [et al.] // Glass and Ceramics. 2023. Vol. 80, no. 7–8. P. 277–282. doi:10.1007/s10717-023-00598-2.
20. Belyakov A. N., Markov M. A., Chekuryaev A. N. Investigation of the reaction-sintered B₄C–SiC materials produced by hot slip casting // Glass Physics and Chemistry. 2023. Vol. 49, no. 3. P. 306–313. doi:10.1134/S1087659623600060.
21. Effect of the carbon component on the strength of reaction-sintered silicon-carbide ceramics / D. A. Dyuskina [et al.] // J. Machinery Manufacture and Reliability. 2024. Vol. 53, no. 2. P. 121–126. doi:10.1134/S1052618824020055.
22. Investigation of the structure and physicomachanical characteristics of reaction-sintered materials B₄C–SiC / A. N. Belyakov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. 2023. Vol. 64, no. 2. P. 67–70. doi:10.1007/s11148-023-00806-0.
23. К вопросу о получении карбидокремниевых материалов методом реакционного спекания / Л. Н. Дьячкова [и др.] // Инженерно-физический журнал. 1997. Т. 70, № 2. С. 260–263.
24. Microstructure, porosity and resistivity in reaction-bonded silicon carbide / Zh. Lu [et al.] // Xi'an jiaotong daxue xuebao. 1999. Vol. 33, no. 4. P. 48–51.
25. Данилович Д. П., Румянцев В. И., Орданьян С. С. Система SiC–TiC–TiB₂ как основа керамоматричных композиционных материалов // Вопросы материаловедения. 2009. no. 4 (60). С. 42–47.

References

1. Ruys A. J. *Silicon carbide ceramics structure, properties, and manufacturing*. Elsevier, 2023, 585 p.
2. Markov M. A., Krasikov A. V., Kravchenko I. N., Erofeev M. N., Bykova A. D., Belyakov A. N. Development of novel ceramic construction materials based on silicon carbide for products of complex geometry. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2021, Vol. 50, no. 2, pp. 158–163. doi:10.3103/S1052618821020096.
3. Izhevskiy V. A., Genova L. A., Bressiani J. C., Bressiani A. H. Review article: Silicon carbide. Structure, properties and processing. *Ceramica*, 2000, Vol. 46 (297), pp. 4–13. doi:10.1590/S0366-69132000000100002.
4. Belyakov A. N., Markov M. A., Kravchenko I. N., Kashtanov A. D., Dyuskina D. A., Bykova A. D., Chekuryaev A. G. Contemporary materials and their application in the construction of special engineering high-temperature objects. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2024, Vol. 64, no. 3, pp. 256–264. doi:10.1007/s11148-024-00835-3.
5. Belyakov A. N., Markov M. A., Dyuskina D. A., Bykova A. D., Chekuryaev A. G., Kashtanov A. D. A comparative study of methods for obtaining silicon carbide ceramic materials. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2023, Vol. 64, no. 3, pp. 299–310. doi:10.1007/s11148-024-00842-4.
6. Belyakov A. N., Markov M. A., Kravchenko I. N., Bykova A. D., Dyuskina D. A., Chekuryaev A. G., Kashtanov A. D. Study of the structural, physical, and mechanical characteristics of reaction-sintered silicon carbide ceramics. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2023, Vol. 52, Suppl. 1, pp. S74–S81. doi:10.3103/S1052618823090029.
7. Chin H., Cheong K., Ismail A. A review on die attach materials for SiC-based high-temperature power devices. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2010, Vol. 41, pp. 824–832. doi:10.1007/s11663-010-9365-5.
8. Markov M. A., Vikhman S. N., Belyakov A. N. High-temperature bending tests of reaction-sintered silicon carbide-based ceramic materials. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2023, Vol. 96, no. 1, pp. 16–20. doi:10.1134/S1070427223010032.

9. Wang W., Lian J., Ru H. Pressureless sintered SiC matrix toughened by in situ synthesized TiB₂: process conditions and fracture toughness. *Ceramics International*, 2012, Vol. 38 (3), pp. 2079–2085. doi:10.1016/j.ceramint.2011.10.045.
10. Cabrero J., Audubert F., Pailler R. Fabrication and characterization of sintered TiC–SiC composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, Vol. 31, no. 3, pp. 313–320. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2010.10.01.
11. Zhu S., Mizuno M., Kagawa Y., Mutoh Y. Monotonic tension, fatigue and creep behavior of SiC–fiber-reinforced SiC–matrix composites: a review. *Composites Science and Technology*, 1999, Vol. 59, no. 6, pp. 833–851. doi:10.1016/S0266-3538(99)00014-7.
12. Zhang L., Yang H., Guo X. Preparation and properties of silicon carbide ceramics enhanced by TiN nanoparticles and SiC whiskers. *Scripta Materialia*, 2011, Vol. 65, no. 3, pp. 186–189. doi:10.1016/j.scriptamat.2011.03.034.
13. Wei G., Becher P. Improvements in mechanical properties in SiC by addition of TiC particles. *Journal of the American Ceramic Society*, 1984, Vol. 67, no. 8, pp. 571–574. doi:10.1111/j.1151-2916.1984.tb19174.x.
14. Endo H., Ueki M., Kubo H. Microstructure and mechanical properties of hot-pressed SiC–TiC composites. *Journal of Materials Science*, 1991, Vol. 26, pp. 3769–3774. doi:10.1007/BF01184969.
15. McMurtry C., Boecker W., Seshadri S., Zanghi J., Garnier J. Microstructure and materials properties of SiC–TiB₂ particulate composites. *American Ceramic Society Bulletin*, 1987, Vol. 66, pp. 325–329.
16. Khodaei M., Yaghobizadeh O., Reza B. Effects of different sintering methods on the properties of SiC–TiC, SiC–TiB₂ composites. *International Journal of refractory metals and hard materials*, 2018, Vol. 70, pp. 19–31. doi:10.1016/j.ijrmhm.2017.09.005.
17. Garshin A. P., Chulkin S. G. *Reakcionno-spechennye karbidokremnievye materialy konstrukcionnogo naznacheniya. Fiziko-mekhanicheskie i tribotekhnicheskie svoystva* [Reaction-sintered silicon carbide materials for structural purposes. Physical, mechanical and tribological properties]. Saint Petersburg, Publishing house of the Polytechnic University, 2006, 83 p. (In Russ.).
18. Samoilov V. M., Porodzinsky I. A. Poluchenie i issledovanie karbidokremnievkh materialov na osnove reakcionnosvyazannogo karbida kremniya [Production and study of silicon carbide materials based on reaction-bonded silicon carbide]. *Perspektivnye materialy* [Advanced Materials], 2014, no. 3, pp. 67–71. (In Russ.).
19. Markov M. A., Belyakov A. N., Dyuskina D. A., Chekuryaev A. G., Bykova A. D., Perevislov S. N., Kashtanov A. D. Methods of forming geometrically complex manufactured products from silicon-carbide based, heat-resistant, ceramic materials. *Glass and Ceramics*, 2023, Vol. 80, no. 7–8, pp. 277–282. doi:10.1007/s10717-023-00598-2.
20. Belyakov A. N., Markov M. A., Chekuryaev A. N. Investigation of the reaction-sintered B₄C–SiC materials produced by hot slip casting. *Glass Physics and Chemistry*, 2023, Vol. 49, no. 3, pp. 306–313. doi:10.1134/S1087659623600060.
21. Dyuskina D. A., Markov M. A., Kravchenko I. N., Kashtanov A. D. Effect of the carbon component on the strength of reaction-sintered silicon–carbide ceramics. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2024, Vol. 53, no. 2, pp. 121–126. doi:10.1134/S1052618824020055.
22. Belyakov A. N., Markov M. A., Perevislov S. N., Dyuskina D. A., Chekuryaev A. G., Bykova A. D., Kashtanov A. D. Investigation of the structure and physicomechanical characteristics of reaction-sintered materials B₄C–SiC. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2023, Vol. 64, no. 2, pp. 67–70. doi:10.1007/s11148-023-00806-0.
23. Dyachkova L. N., Zvonarev E. V., Shelekhina V. M., Isupov M. A. K voprosu o poluchenii karbidokremnievkh materialov metodom reakcionnogo spekaniya [On the issue of obtaining silicon carbide materials by reaction sintering]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal* [Engineering Physics Journal], 1997, Vol. 70, No. 2, pp. 260–263. (In Russ.).
24. Lu Zh., Ziong L., Gao J., Jin Zh. Microstructure, porosity and resistivity in reaction-bonded silicon carbide. *Xi'an jiaotong daxue xuebao*, 1999, Vol. 33, no. 4, pp. 48–51.
25. Danilovich D. P., Rumyantsev V. I., Ordanyan S. S. Sistema SiC–TiC–TiB₂ kak osnova keramomatrichnykh kompozicionnykh materialov [The SiC–TiC–TiB₂ system as a basis for ceramic matrix composite materials]. *Voprosy materialovedeniya* [Material Science Issues], 2009, no. 4 (60), pp. 42–47. (In Russ.).

Информация об авторе

А. Д. Быкова — кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Information about the author

A. D. Bykova — PhD (Engineering), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 03.06.2025; одобрена после рецензирования 24.06.2025; принята к публикации 08.07.2025.
The article was submitted 03.06.2025; approved after reviewing 24.06.2025; accepted for publication 08.07.2025.