

Научная статья
УДК 666.792.32
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.007

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ АЛМАЗ — КАРБИД КРЕМНИЯ

Антон Николаевич Беляков¹, Михаил Александрович Марков²

^{1, 2}Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» — Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», Санкт-Петербург, Россия

¹anton_belyakov_n@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7849-7315>

²barca0688@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3196-7535>

Аннотация

Представлены результаты испытаний пулестойкости композиционного материала «алмаз — карбид кремния», синтезированного методом реакционного спекания. Экспериментальные бронепанели, собранные из мозаики керамических плит на подложке из сверхмолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), тестировались на соответствие классам защиты Бр4 и Бр5. Испытания включали обстрел бронебойными патронами калибров 7,62 × 54 мм (57-Н-323С), 5,45 × 39 мм (7Н24, 7Н39) и снайперскими 7,62 × 54 мм (7Н13, 7-БЗ-3). Результаты подтвердили, что для класса Бр4 достаточно плит толщиной 6 мм (поверхностная плотность 29,9 кг/м²), что недостижимо для традиционных керамик, а для класса Бр5 плиты 8 мм обеспечивают полную защиту от винтовочных патронов СВД, включая бронебойно-зажигательные.

Ключевые слова:

керамика, алмаз, карбид кремния, корунд, углерод, реакционное спекание, кремний, броневые материалы, пулестойкость

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:

Беляков А. Н., Марков М. А. Перспективный композиционный материал алмаз — карбид кремния // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 46–50. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.007.

Original article

ADVANCED COMPOSITE MATERIAL DIAMOND-SILICON CARBIDE

Anton N. Belyakov¹, Mikhail A. Markov²

^{1, 2}NRC "Kurchatov Institute"—CRISM "Prometey", Saint Petersburg, Russia

¹anton_belyakov_n@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7849-7315>

²barca0688@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3196-7535>

Abstract

This study presents ballistic test results for a diamond-silicon carbide composite synthesized via reactive sintering. Experimental armor panels—comprising a mosaic of ceramic tiles bonded to an ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) backing—were evaluated against Russian GOST Br4 and Br5 protection standards. Testing involved impacts from armor-piercing rounds including 7,62×54 mm (57-N-323S), 5,45×39 mm (7N24, 7N39), and SVD sniper rifle cartridges (7N13, 7-BZ-3) in 7,62×54 mm. Results demonstrate that Br4 compliance is achieved with 6-mm-thick tiles (areal density: 29,9 kg/m²), a benchmark unattainable with conventional ceramics; Br5 protection against SVD rounds (including armor-piercing incendiary types) requires 8-mm tiles.

Keywords:

ceramics, diamond, silicon carbide, corundum, carbon, reaction sintering, silicon, armor materials, bullet resistance

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:

Belyakov A. N., Markov M. A. Advanced composite material diamond-silicon carbide // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 46–50. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.007.

Введение

Композиционные материалы на основе алмаза и карбида кремния, полученные методом реакционного спекания пористой алмазной заготовки жидким кремнием, представляют собой новое поколение технической керамики. Их уникальные свойства — сочетание рекордной твердости (50–75 ГПа), исключительной удельной жесткости (до $24,4 \cdot 10^6$ м), высокой теплопроводности (до 650 Вт/м К), превосходящей медь, и низкого температурного коэффициента линейного расширения ($1,9\text{--}2,3 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹) — открывают широкие перспективы в критически важных отраслях. Научной группой С. К. Гордеева (ЦНИИМ) подробно исследована технология реакционного спекания алмазкарбидокремниевого композиционного материала и зависимость структуры и свойств данного материала от его состава [1–7].

В авиационных и ракетных двигателях материал востребован для изготовления деталей, работающих в экстремальных условиях. Показано успешное применение в сопловых аппаратах газовых турбин, где лопатки из данного композита выдерживают высокотемпературные потоки до 1500 °С при циклических тепловых нагрузках [8]. Исключительная износостойкость материала определяет его использование в узлах трения экстремальных условий. Коэффициент трения при работе в паре «композит-композит» составляет 0,025 в водной среде и 0,012 в масляной, при удельном износе менее 7 нм/км устойчивость к абразивному и эрозионному износу в 300 раз выше, чем у реакционно-спеченного карбида кремния [4; 9]. Это позволяет применять его в высоконагруженных парах трения авиационных двигателей, подшипниках специального назначения, соплах гидроабразивной резки и футеровках оборудования для обработки абразивных сред. Технология безусадочного спекания обеспечивает изготовление деталей сложной геометрии с точностью до 0,1 мм без последующей механической обработки.

Перспективы бронезащиты. Сочетание высокой скорости звука (до 15,6 км/с) и твердости обеспечивает рекордные значения стойкости к высокоскоростному ударному воздействию. Это уникальное сочетание свойств указывает на высокий потенциал для броневых применений. Комбинация сверхвысокой твердости алмазной фазы, прочной карбидокремниевой матрицы с транскристаллитным характером разрушения и низкой плотности создает предпосылки для эффективного поглощения кинетической энергии. Перспективны исследования многослойных бронеконструкций с наружным слоем из композита алмаз — карбид кремния. В последние годы научной группой под руководством академика РАН В. Я. Шевченко опубликованы исследования, посвященные теории разрушения композитов алмаз — карбид кремния при ударном воздействии, где описываются и оптимизируются уникальные броневые свойства таких композитов [10–15]. Таким образом, композиты *алмаз — карбид кремния* представляют стратегический материал для новых поколений аэрокосмической и оборонной техники, сочетающий беспрецедентные эксплуатационные характеристики с возможностью изготовления изделий сложной формы. Дальнейшие исследования данного материала должны быть направлены на оптимизацию состава для специфических задач бронезащиты.

Целью данной работы является анализ пулевой стойкости алмазного композита по классам защиты Бр4 и Бр5 в составе опытных броневых панелей.

Результаты

Важной особенностью проведения испытаний алмазных керамик на пулевую стойкость является технологический аспект сборки опытных броневых панелей. В нашем эксперименте броневая панель представляла собой склейку радиусных керамических плит 50×50 мм и их составляющих частей (всего 29 элементов) стык в стык на подложке из сверхмолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) в оболочке из арамидной ткани, стянутой герметиком типа УГ-2. Фактически броневая панель представляет собой «сэндвич» из мозаики керамических плит.

При реализации испытаний на класс защиты Бр4 в рамках эксперимента рассмотрены различные варианты толщины керамических плит от 6 до 10 мм, а также различные варианты толщины подложек от 8 до 10 мм. Варьируемые параметры существенным образом влияют на вес конструкции, что следует принимать во внимание при анализе эксперимента, поверхностная плотность конструкций изменяется в диапазоне от 29,9 до 41,5 кг/м².

Для проведения опытных пулевых испытаний (на класс защиты Бр4) нами были выбраны следующие типы патронов, широко применяемых в военных операциях: 1) 57-Н-323С — винтовочный патрон с пулей со стальным сердечником, предназначен для поражения живой силы и небронированной техники, калибр $7,62 \times 54$ мм; 2) 7Н24 — патрон с бронебойной пулей для поражения живой силы (с индивидуальными средствами защиты), а также легкобронированных огневых средств. Состоит из стальной оболочки, покрытой томпаком, тупоконечного сердечника из твердого сплава ВК8 на основе карбида вольфрама и свинцовой рубашки, калибр $5,45 \times 39$ мм; 3) 7Н39 — по пробитию превосходит в 1,8 раза патрон 7Н24. Состоит из стальной оболочки, плакированной томпаком, твердосплавного сердечника и свинцовой рубашки. Сердечники такого типа изготавливают из вольфрамокобальтовых порошков, калибр $5,45 \times 39$ мм.

Испытания на пулестойкость по классу защиты Бр4 на дистанции 10 м (патрон 57-Н-323С) и 50 м (патроны 7Н24, 7Н39) для всех представленных выборок броневых панелей показали положительный результат, связанный с отсутствием сквозных отверстий в конструкции (непробитием). На некоторых образцах броневых панелей зафиксирована незначительная деформация подложки в зоне попадания снаряда без ее разрушения. Следует отметить, что высокие защитные свойства керамики *алмаз — карбид кремния* подтверждаются также при использовании наименьшей толщины броневой плиты 6 мм с минимальной поверхностной плотностью, что на сегодняшний день невозможно реализовать в известных броневых материалах, используемых в мировой практике. Данный факт говорит о больших перспективах развития материаловедческого направления, связанного с созданием керамик нового класса с повышенными броневыми свойствами.

При испытаниях в соответствии с классом защиты Бр5 в рамках эксперимента рассмотрено два варианта толщины керамических плит — 7,3 и 8 мм — при толщине подложки 10 мм. Соответственно, варьируемые параметры существенным образом влияют на вес конструкции, что следует принимать во внимание при анализе эксперимента, поверхностная плотность конструкций с увеличением толщины плиты возрастает от 34,3 до 36,7 кг/м².

Для проведения пулевых испытаний (на класс защиты Бр5) нами были выбраны следующие типы патронов снайперской винтовки Драгунова (СВД): 1) 7Н13 — винтовочный патрон повышенной пробиваемости, предназначен для поражения живых целей в средствах индивидуальной бронезащиты и легкобронированной техники, калибр $7,62 \times 54$ мм; 2) 7-БЗ-3 — винтовочный патрон с бронебойно-зажигательной пулей, предназначен для поражения легкобронированных целей и обеспечивает зажжение легкого топлива после пробития брони, калибр $7,62 \times 54$ мм.

Испытания на пулевую стойкость по классу защиты Бр5 пятью выстрелами на дистанции 10 м для опытной броневой панели толщиной 7,3 мм завершились положительным результатом при использовании винтовочных патронов СВД бронебойно-зажигательных патронов, что определяется отсутствием сквозных отверстий в конструкции (непробитием) и деформацией подложки. Тем не менее при использовании патрона повышенной пробиваемости зафиксировано два пробития из пяти выстрелов. Следует отметить, что фрагменты пули при сквозном поражении застряли в теле броневой панели. При увеличении толщины керамических плит до 8 мм мы получили положительный результат по непробитию броневой панели для всех типов патронов. При этом фактическая масса такой конструкции возросла с 2,4 до 2,87 кг. Эффективная площадь защиты по керамической составляющей в настоящем эксперименте осталась неизменной и составила 6,45 дм². Класс защиты Бр5 обеспечивает наивысший уровень защиты, способный выдерживать выстрелы из снайперских винтовок и других энергетически мощных орудий. Исходя из данного факта и принимая во внимание малое расстояние до цели поражения, изложенные результаты испытаний говорят о больших перспективах развития материаловедческого направления, связанного с созданием керамического композита *алмаз — карбид кремния* с повышенными броневыми свойствами.

При оценке преимуществ керамического материала алмаз — карбид кремния следует также учитывать тот факт, что технология реакционного спекания обходится приблизительно в 5–7 раз дешевле технологии горячего прессования.

Выводы

Композиты алмаз — карбид кремния — стратегический материал для новых поколений аэрокосмической и оборонной техники, сочетающий беспрецедентные эксплуатационные характеристики с возможностью изготовления изделий сложной формы. В работе показаны функциональные преимущества керамических реакционно-спеченных материалов алмаз — карбид кремния для броневых применений, экспериментально определены их высокие броневые свойства: 1) по классу защиты Бр4 в составе опытных броневых панелей с различной толщиной керамических плит (6–10 мм), закрепленных на гибкой основе из сверхмолекулярного полиэтилена (8–10 мм). Результаты пулевых испытаний подтверждают качество бронеконструкций, включающих плитки из керамического материала алмаз — карбид кремния; 2) по классу защиты Бр5 в составе опытных броневых панелей с толщиной керамических плит 8 мм, закрепленных на гибкой основе из сверхмолекулярного полиэтилена толщиной 10 мм. Результаты пулевых испытаний положительные и подтверждаются отсутствием пробития опытных бронепанелей винтовочными патронами СВД, в том числе с применением бронебойно-зажигательных пуль.

Список источников

1. Ekstrom T., Gordeev S. New carbide composites with extraordinary properties // Proc. 2nd Int. Symp. on the science of engineering ceramics II. Osaka, 1998. P. 75–79.
2. SiC-Skeleton cemented diamond — novel engineering material with unique properties / S. Gordeev [et al.] // Ceramic Engineering and Science Proceedings. 2000. Vol. 21, no. 3. P. 753–760.
3. Гордеев С. К. Композиты алмаз — карбид кремния — новые сверхтвердые конструкционные материалы для машиностроения // Вопросы материаловедения. 2001. № 3 (27). С. 31–40.
4. Гордеев С. К. Алмазокарбидокремниевые композиционные материалы АКК «Скелетон» // Вопросы материаловедения. 2024. № 1 (117). С. 99–116.
5. Diamond — silicon carbide composite as a promising material for microelectronics and high-power electronics / S. K. Gordeev [et al.] // Radiophysics and Quantum Electronics. 2022. Vol. 65, no. 5–6. P. 434–441.
6. Гордеев С. К., Ежов А. Ю., Каримбаев Т. Д. Дисперсно-упрочнённые композиции «алмаз — карбид кремния» — новые материалы для машиностроения // Композиты и наноструктуры. 2015. Т. 7, № 2 (26). С. 61–71.
7. Каримбаев Т. Д., Мезенцев М. А., Мыктыбеков Б. Карбид кремния, дисперсно-армированный алмазными частицами АКК «Скелетон» для элементов высокотемпературных узлов // Композиты и наноструктуры. 2023. Т. 15, № 4. С. 273–283.
8. Материалы и технологии разработки АО «ЦНИИМ» для изделий авиационной и космической техники / О. П. Шаболдо [и др.] // Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники». 2021. С. 8–22.
9. Wear of new type of diamond composites / P. Larsson [et al.] // Intern. J. Refractory Materials and Hard Metals. 1999. Vol. 7. P. 453–460.
10. New chemical technologies based on Turing reaction-diffusion processes / V. Y. Shevchenko [et al.] // Doklady Chemistry. 2021. Vol. 496, no. 2. P. 28–31.
11. Shevchenko V. Y., Perevislov S. N., Ugolkov V. L. Physicochemical interaction processes in the carbon (diamond)-silicon system // Glass Physics and Chemistry. 2021. Vol. 47, no. 3. P. 197–208.
12. Shevchenko V. Y., Perevislov S. N. Reaction-diffusion mechanism of synthesis in the diamond — silicon carbide system // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2021. Vol. 66, no. 8. P. 1107–1114.
13. Determination of the mechanical characteristics of the Ideal ceramic (diamond — silicon carbide composite) / V. Y. Shevchenko [et al.] // Glass Physics and Chemistry. 2023. Vol. 49, no. 6. P. 539–543.
14. About the criteria for the choice of materials to protect against the mechanical dynamic loading / V. Y. Shevchenko [et al.] // Glass Physics and Chemistry. 2021. Vol. 47, no. 4. P. 281–288.
15. Bogdanov S. P., Dolgin A. S., Perevislov S. N. Effect of diamond phase dispersion on the properties of diamond-SiC-Si Composites // Ceramics. 2023. No. 6. P. 1632–1649.

References

1. Ekstrom T., Gordeev S. New carbide composites with extraordinary properties. *Proceedings of the 2nd Int. Symp. on the science of engineering ceramics II*. Osaka, 1998, pp. 75–79.

2. Gordeev S., Zhukov S., Danchukova L., Ekstrom T., Zheng J. SiC-Skeleton cemented diamond — novel engineering material with unique properties. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2000, Vol. 21, no. 3, pp. 753–760. (In Russ.).
3. Gordeev S. K. Kompozity almaz — karbid kremniya — novye sverhtverdye konstrukcionnye materialy dlya mashinostroeniya [Diamond – silicon carbide composites – new superhard structural materials for mechanical engineering]. *Voprosy materialovedeniya* [Material Science Issues], 2001, no. 3 (27), pp. 31–40. (In Russ.).
4. Gordeev S. K. Almazokarbidokremnievye kompozicionnye materialy AKK "Skeleton" [Diamond-silicon carbide composite materials AKK "Skeleton"]. *Voprosy materialovedeniya* [Material Science Issues], 2024, no. 1 (117), pp. 99–116. (In Russ.).
5. Gordeev S. K., Korchagina S. B., Zapevalov V. E., Parshin V. V., Serov E. A. Diamond — silicon carbide composite as a promising material for microelectronics and high-power electronics. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2022, Vol. 65, no. 5–6, pp. 434–441.
6. Gordeev S. K., Ezhov A. Yu., Karimbaev T. D. Dispersno-uprochnennye kompozicii "almaz — karbid kremniya" — novye materialy dlya mashinostroeniya [Dispersion-strengthened "diamond — silicon carbide" composites — new materials for mechanical engineering]. *Kompozity i nanostruktury* [Composites and Nanostructures], 2015, Vol. 7, no. 2 (26), pp. 61–71. (In Russ.).
7. Karimbaev T. D., Mezentshev M. A., Myktybekov B. Karbid kremniya, dispersno-armirovannyj almaznymi chastitsami AKK "Skeleton" dlya elementov vysokotemperaturnyh uzlov [Silicon carbide dispersion-reinforced with diamond particles AKK "Skeleton" for elements of high-temperature units]. *Kompozity i nanostruktury* [Composites and Nanostructures], 2023, Vol. 15, no. 4, pp. 273–283. (In Russ.).
8. Shaboldo O. P., Gordeev S. K., Vikhman V. B., Trubin D. A. Materialy i tekhnologii razrabotki AO "CNIIM" dlya izdelij aviacionnoj i kosmicheskoy tekhniki [Materials and technologies developed by JSC TsNIM for products of aviation and space technology]. *Materialy V Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Materialy i tekhnologii novogo pokoleniya dlya perspektivnyh izdelij aviacionnoj i kosmicheskoy tekhniki"* [Proceedings of the V All-Russian Scientific and Technical Conference "Materials and Technologies of New Generation for Promising Products of Aviation and Space Technology"], 2021, pp. 8–22. (In Russ.).
9. Larsson P., Axen N., Ekstrom T., Gordeev S., Hogmark S. Wear of new type of diamond composites. *International Journal of Refractory Materials and Hard Metals*, 1999, Vol. 7, pp. 453–460.
10. Shevchenko V. Y., Perevislov S. N., Kovalchuk M. V., Oryshchenko A. S. New chemical technologies based on Turing reaction-diffusion processes. *Doklady Chemistry*, 2021, Vol. 496, no. 2, pp. 28–31.
11. Shevchenko V. Y., Perevislov S. N., Ugolkov V. L. Physicochemical interaction processes in the carbon (diamond)-silicon system. *Glass Physics and Chemistry*, 2021, Vol. 496, no. 3, pp. 197–208.
12. Shevchenko V. Y., Perevislov S. N. Reaction-diffusion mechanism of synthesis in the diamond — silicon carbide system. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2021, Vol. 66, no. 8, pp. 1107–1114.
13. Shevchenko V. Y., Oryshchenko A. S., Belyakov A. N., Perevislov S. N. Determination of the mechanical characteristics of the Ideal ceramic (diamond–silicon carbide composite). *Glass Physics and Chemistry*, 2023, Vol. 49, no. 6, pp. 539–543.
14. Shevchenko V. Y., Perevislov S. N., Oryshchenko A. S., Sil'nikov M. V. About the criteria for the choice of materials to protect against the mechanical dynamic loading. *Glass Physics and Chemistry*, 2021, Vol. 47, no. 4, pp. 281–288.
15. Bogdanov S. P., Dolgin A. S., Perevislov S. N. Effect of diamond phase dispersion on the properties of diamond-SiC-Si Composites. *Ceramics*, 2023, no. 6, pp. 1632–1649.

Информация об авторах

А. Н. Беляков — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

М. А. Марков — доктор технических наук, начальник сектора.

Information about the authors

A. N. Belyakov — PhD (Engineering), Senior Researcher;

M. A. Markov — DSc (Engineering), Head of Sector.

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.