

УДК: 620.168; 623.562.3

DOI: 10.53816/20753608_2021_3_107

**КОМПОЗИТНЫЕ ОРГАНОКЕРАМИЧЕСКИЕ ПАНЕЛИ
ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ПУЛЬ КАЛИБРА 7,62 ММ И 5,45 ММ
С ТЕРМОУПРОЧНЕННЫМ СЕРДЕЧНИКОМ
НА ОСНОВЕ КЕРАМИКИ АЛМАЗ-КАРБИД КРЕМНИЯ
С РЕГУЛИРУЕМОЙ ВЗАИМОСВЯЗАННОЙ СТРУКТУРОЙ**

**COMPOSITE ORGANOCERAMIC PANELS BASED ON DIAMOND-SILICON
CARBIDE CERAMICS WITH AN ADJUSTABLE INTERCONNECTED STRUCTURE
FOR PROTECTION AGAINST BULLETS OF 7,62 MM AND 5,45 MM CALIBER
WITH A HARDENED STEEL CORE**

*Академик РАРАН М.В. Сильников¹, В.Я. Шевченко², чл.-корр. РАРАН А.И. Михайлин¹,
С.Н. Перевислов², Н.М. Сильников¹*

¹АО «НПО Спецматериалов», ²Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН

M.V. Silnikov, V.Ya. Shevchenko, A.I. Mikhaylin, S.N. Perevislov, N.M. Silnikov

Рассматривается новый тип керамики с уникальной структурой и проводятся оценки его применимости к задачам бронезащиты. В качестве исходных компонентов керамики используют порошок кремния и смесь алмазных порошков с размерами частиц, обеспечивающих в дальнейшем образование иерархической структуры. В полученной микроструктуре алмаз- β -SiC кристаллы алмаза имеют правильную форму и однородно распределены в композите. По сравнению со стандартными реакционно-спеченными карбидом кремния и карбидом бора материал показал наивысшие механические характеристики.

Ключевые слова: трижды периодические поверхности минимальной энергии, реакция Тьюринга, гетерогенетические пары неорганических веществ, система алмаз (углерод)-кремний, карбиды, баллистические испытания, органокерамическая панель, пулестойкость, Бр4.

The authors consider a new type of ceramics with a unique structure and evaluate its applicability to the body armor issues. The authors consider a new type of ceramics with a unique structure and evaluate its applicability to the body armor issues. The initial components of the ceramic are silicon powder and a mixture of diamond powders with a size of particles that subsequently provide the formation of a hierarchical structure. In the resulting microstructure-diamond — β -SiC, the diamond crystals have a regular shape and are uniformly distributed in the composite. Compared with a standard reaction-sintered silicon carbide and a boron carbide, the material showed the highest mechanical characteristics.

Keywords: triple-periodic surfaces of minimum energy, Turing reaction, heterogeneous pairs of inorganic substances, diamond(carbon)-silicon system, carbides, ballistic tests, organoceramic panel, bullet resistance, Br4.

Введение

Одними из основных свойств, определяющих защитные характеристики композитных па-

нелей при воздействии боеприпасами с термоупрочненным сердечником, являются твердость и модуль упругости керамики [1–5]. Развитие современной технологии позволяет повысить

уровень этих свойств керамики, приблизив их значение к предельному, наблюдаемому у алмаза. Представленная работа рассматривает новый тип композиционной керамики на основе алмазных частиц с уникальной трижды периодической микроструктурой и оценивает перспективу использования ее в качестве бронезащиты.

Из известных керамик на основе карбида кремния и карбида бора получают композиты на основе двух и более компонентов, обладающие оптимальными свойствами. Для этого используют технологию реакционного спекания (пропитки расплавом жидкого кремния пористых заготовок, до получения монолитного материала). Преимуществом данного метода, по сравнению с горячим прессованием, является более низкая температура спекания материалов, возможность использования крупных исходных порошков, высокая производительность [6]. Так, реакционно-спеченный карбид кремния получают при температуре выше температуры плавления кремния (1414 °C).

В качестве примера можно также привести получение реакционно-спеченного карбида кремния, армированного частицами карбида бора [7]. Выбор в качестве второго компонента карбида бора обусловлен желанием сохранить высокую твердость керамики при снижении её плотности.

В работах [8–10] описан метод получения композиционного материала алмаз-карбид кремния, полученный методом реакционной пропитки жидким кремнием пористой заготовки из алмазных частиц.

Из основных этапов метода реакционного спекания можно выделить следующие:

- прессование заготовок из порошков требуемого состава;
- создание материалов, включающих систему открытых пор между частицами заготовки;
- заполнение пор заготовки расплавом кремния;
- контроль за течением химической реакции между алмазными частицами, углеродом и кремнием путем регулирования концентрации компонентов, температуры спекания и выдержки при спекании.

Новый композиционный материал алмаз-карбид кремния назван «Идеал» [11, 12].

В материале «Идеал» карбид кремния синтезируется в результате реакционно-диффузионно-

го взаимодействия кремния с графитом, образовавшемся на поверхности алмазных частиц при их поверхностной графитизации [13]. Важным условием при спекании является наличие хорошо ограненных частиц алмаза, что приводит к образованию когерентных границ растущих кристаллов карбида кремния на частицах алмаза.

В качестве исходных компонентов композиционного материала алмаз-карбид кремния используют смесь алмазных порошков разного фракционного состава, для обеспечения плотной упаковки частиц заготовки при формовании. Регулирование концентрации компонентов, температуры процесса пропитки, давления среды и т.д. позволяет реализовать реакционно-диффузионный механизм Тьюринга (синтеза и роста «забора» Тьюринга — кристаллов карбида кремния на частицах алмаза [14, 15]) и получить материал с регулярной (периодической) микроструктурой. Материал «Идеал», по сравнению со стандартными реакционно-спеченными материалами на основе карбида кремния и карбида бора [6], характеризуется наивысшими механическими характеристиками (выше только у монокристаллического алмаза) (таблица). В полученной микроструктуре композиционного материала алмаз-карбид кремния частицы алмаза имеют правильную форму и однородно распределены в объеме композита (рис. 1). Пор в материале практически нет, что говорит о прочной межфазной связи между алмазом и карбидом кремния, вследствие полного протекания экзотермической реакции образования карбида кремния.

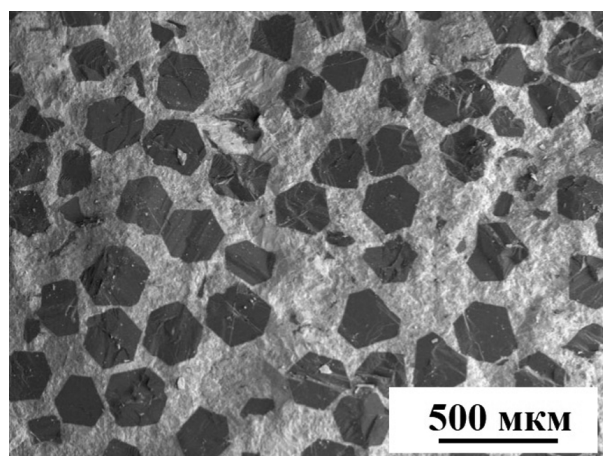


Рис. 1. Микроструктура композиционного материала алмаз-карбид кремния («Идеал»)

Механические свойства материалов на основе SiC, B₄C и алмаза

Материал	Плотность ρ , г/см ³	Модуль упругости E , ГПа	Прочность при изгибе, МПа	Скорость звука, м/с	Коэффициент трещиностойкости, МПа·м ^{1/2}	Твердость по Виккерсу, ГПа
SiSiC	3,10	329	400	10200	3,5	21
LPSSiC	3,25	358	520	10800	5,5	21
HPB ₄ C	2,75	431	450	13000	3,8	32
Композит «Идеал»	3,35	754	420	15000	4,5	65

SiSiC — реакционно-спеченный карбид кремния; LPSSiC — жидкофазно-спеченный карбид кремния; HPB₄C — горячепрессованный карбид бора

Методика эксперимента и результаты баллистических испытаний

Существует несколько методик оценки баллистических характеристик собственно керамики [16]. Однако на практике керамика используется в составе композитных блоков, включающих, помимо керамического слоя, металлическую или полимерную подложку, а также тканевый защитный пакет. Поэтому целесообразно проводить оценку защитных свойств керамики в составе защитной структуры.

Испытания проводили на модельных образцах композитных органокерамических структур. Образец представлял собой отдельную керамическую плитку размером 65×65 мм и толщиной 5,5 мм, закрепленную с помощью монтажной этиленвинилацетатной пленки толщиной 300 мкм на прессованную пластину из UD сверхвысокомодульного полиэтилена, размером 800×800 мм и толщиной 11 мм. Образцы композитных структур обмотаны двумя слоями арамидной ткани Тварон 716. Структура образца представлена на рис. 2. При обстреле образцы помещали на слой войлока.

В случае испытаний единичной керамической плитки при обстреле ударные волны сжатия распространяются в объеме керамической плитки, при достижении границ плитки отражаются и переходят в волны растяжения. Суперпозиция волн растяжения приводит к росту существующих трещин и образованию новых. Следует учитывать, что условия испытаний при обстреле единичной плитки оказываются значительно более сложными, чем при испытании комплексной структуры, состоящей из нескольких соприкасающихся плиток.

При обстреле из автомата АК-103 калибра 7,62 мм пулями ПС со стальным термоупрочненным сердечником, патрона инд. 57-Н-231 на дистанции 10 м, все образцы выдержали испытание.

Наружные слои арамидных пакетов пробиты и разорваны на площади, примерно в 10 раз превышающей площадь соударения (рис. 3). Картина разрушения керамики во всех случаях характеризуется протяженной областью разрушения с образованием так называемого «обратного» конуса Герца. Опорный слой во всех случаях частично пробит и сильно деформирован, наблюдается частичное расслоение. Тылный слой арамидных пакетов не поврежден.

Поскольку при испытаниях используется единичная керамическая плитка, важную роль играет место попадания пули — в центр плитки или вблизи края. Можно ожидать, что попадание в центр плитки будет иметь менее разрушитель-

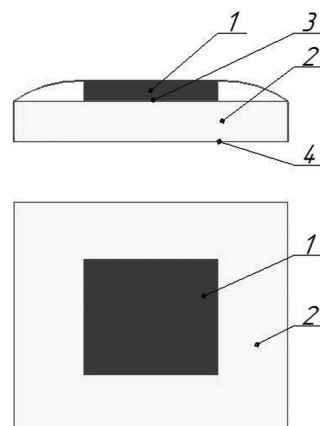


Рис. 2. Образец для баллистических испытаний:
1 — керамическая плитка; 2 — подложка из сверхвысокомолекулярного полиэтилена;
3 — монтажная пленка, склеивающая керамику и подложку; 4 — обмотка образца арамидной тканью

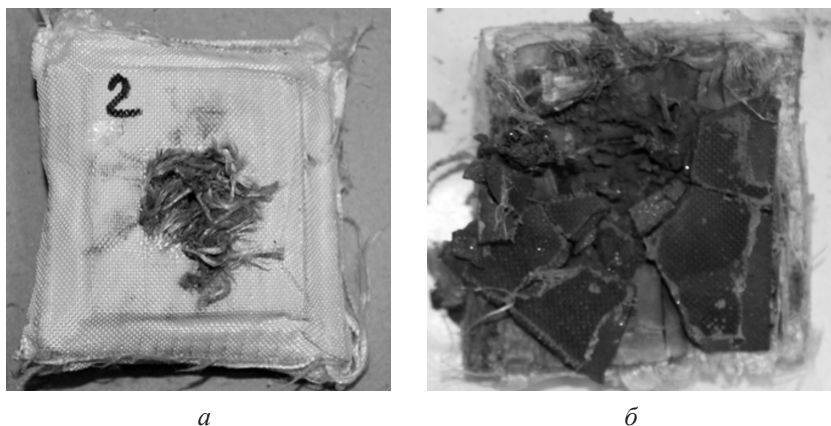


Рис. 3. Образец после выстрела из автомата АК-103 калибра 7,62 мм пулей ПС со стальным термоупрочнённым сердечником, патрона инд. 57-Н-231 со скоростью 706 м/с: а — внешний вид; б — вид разрушенной керамической плитки на подложке после снятия внешнего арамидного пакета

ные последствия по сравнению с попаданием вблизи края.

На рис. 3 представлен вид образца после выстрела вблизи центра плитки (скорость пули 706 м/с). Место попадания пули в плитку смещено по диагонали от центра примерно на 2 мм. Разрушение керамической плитки характеризуется 4–5 крупными фрагментами (кусками) керамики в совокупности составляющими до 2/3 объема плитки, несколькими более мелкими фрагментами помельче и большим количеством мелких и мельчайших фрагментов в области, примыкающей к левому верхнему углу, ближайшему к месту попадания пули.

Подобная картина разрушения наблюдается и при попадании пули вблизи угла плитки (рис. 4). Место попадания пули в этом случае смещено к правому нижнему углу плитки. Зона сплошного

разрушения керамической плитки захватывает примерно треть объема плитки и расположена в углу, ближайшем к месту попадания пули. Вся остальная часть плитки разрушена на несколько больших фрагментов радиальными трещинами. Аналогичная картина наблюдалась и для других образцов со смещенной точкой попадания пули.

Следует отметить, что при попадании вблизи угла плитки реализуются наименее благоприятные, с точки зрения проверки на пулестойкость, условия. В этой области расстояния до свободных поверхностей плитки оказываются сопоставимыми с её толщиной. Поэтому велика вероятность интерференции волн разгрузки, образовавшихся при отражении волн нагрузки от свободных боковых поверхностей. Возникающие большие растягивающие напряжения приводят к дроблению керамики с образованием мелких частиц. В более

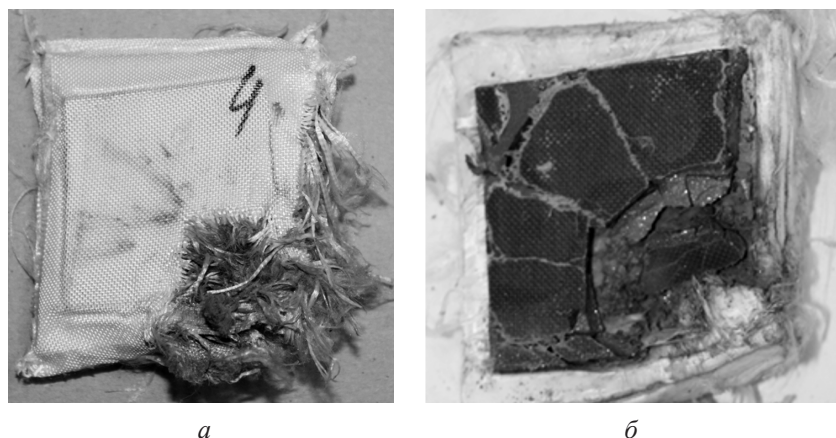


Рис. 4. Образец после выстрела из автомата АК-103 калибра 7,62 мм пулей ПС со стальным термоупрочнённым сердечником, патрона инд. 57-Н-231 со скоростью 714 м/с: а — внешний вид; б — вид разрушенной керамической плитки на подложке после снятия внешнего арамидного пакета

отдаленной области формируются радиальные трещины, распространяющиеся вплоть до выхода на поверхность плитки. Наблюдаемая картина разрушения керамической плитки свидетельствует о высоком потенциале композита «Идеал» в качестве броневых материалов.

При взаимодействии с керамической плиткой медная оболочка пули разрывается, а сердечник из высокопрочной углеродистой стали, имеющий твердость 56 HRC, частично разрушается. На рис. 5 представлен вид исходного сердечника пули и вид сердечника, застрявшего в опорном слое из прессованного UD сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Длина сердечника пули при прохождении керамического слоя уменьшилась с 20 мм до 14 мм, то есть на 30 %, а его масса уменьшилась с 3,5 г до 3,1 г — на 10 %. Срабатывание (разрушение) сердечника при прохождении керамического слоя приводит к тому, что первоначально коническая форма наконечника превращается в плоскую со следами эрозии (рис. 5).

После пробития керамической плитки сердечник проникает в опорный слой примерно на

половину его толщины. Диаметр перфорации отдельных слоев подложки брони быстро уменьшается с 20 мм у поверхностного слоя, до 1 мм у 49 слоя. Слои после испытаний имеют обугленные края, что говорит о значительном нагревании сердечника пули при прохождении через керамическую плитку (рис. 6). В конечном положении сердечник во всех случаях был развернут на угол около 75° по отношению к первоначальной траектории движения. Во всех случаях адгезия между керамическими плитками и подложкой была полностью нарушена.

При испытаниях защитной структуры использовали также автомат АК-74 с патронами инд. 7Н10, пульей ПП со стальным термоупрочненным сердечником. Все образцы выдержали испытания. На рис. 7 представлен вид образца после обстрела пульей калибра 5,45 мм.

Обсуждение результатов

В работе при испытаниях использовали изолированную керамическую плитку. Боковые поверхности плитки были свободными. В этих условиях

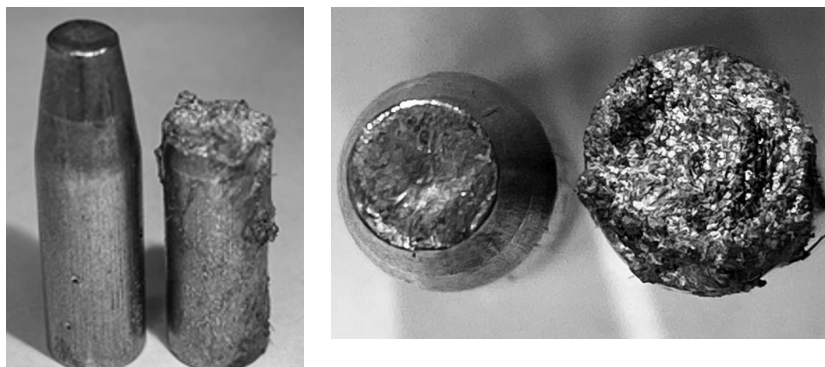


Рис. 5. Вид термоупрочненного сердечника пули калибра 7,62: слева — исходный, справа — после выстрела по защитной структуре

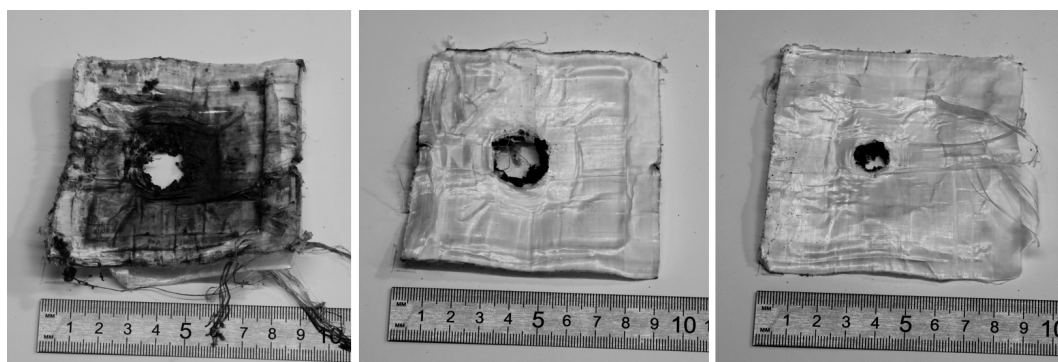


Рис. 6. Слои подложки после выстрела. Слева направо: 1-й, 25-й и 49-й

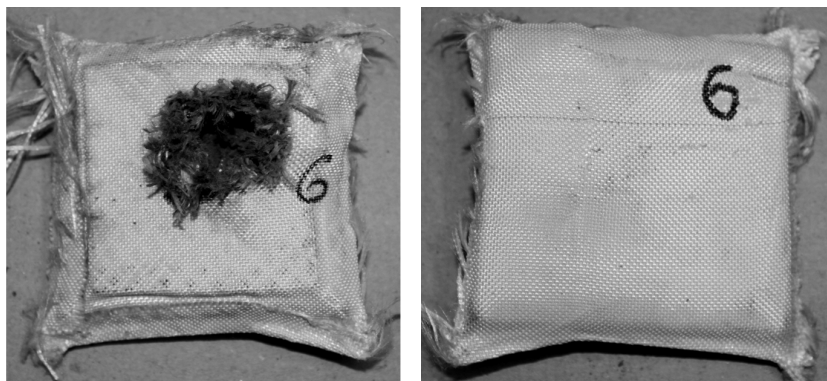


Рис. 7. Образец после выстрела из автомата АК-74 с патронами инд. 7Н10, пульей ПП со стальным термоупрочненным сердечником (скорость 906 м/с). Показаны лицевая и тыльные стороны образца

возникшие при ударе волны сжатия распространяются по керамике и отражаются от свободных боковых поверхностей в виде волн растяжения. Суперпозиция волн растяжения и их взаимодействие с зародившимися трещинами приводит к разрушению керамики. Кроме того, из-за наличия свободных боковых поверхностей, разрушенные частицы керамики могут разрушаться и отлетать от зоны попадания пули и снизить, тем самым, абразивное воздействие на материал пули.

В [17] показано, что наличие стальной рамки, ограничивающей керамическую плитку с боков, приводит к заметному повышению защитных свойств керамики на основе В4С при воздействии пуль с термоупрочненным сердечником калибра 7,62, по сравнению с плиткой со свободными боковыми поверхностями. По данным [18], эффект снижения защитных свойств за счет свободных боковых поверхностей проявляется особенно сильно в условиях, когда характерный размер плитки превышает диаметр ударника не более чем в 15 раз, в нашем случае это соотношение равно 11. Для попаданий вблизи угла плитки расстояние до свободных поверхностей минимально, и в этом случае эффект снижения защитных свойств керамики должен проявляться особенно сильно. Но и при попадании вблизи угла плитки структура выдержала испытания, что говорит о высоком потенциале керамики «Идеал» в качестве броневых материалов. Совершенствование средств индивидуальной защиты идет одновременно по нескольким направлениям [19–21], и одним из важнейших является создание новой высокопрочной керамики.

Оценим характеристики керамики «Идеал» с точки зрения практического применения в

средствах индивидуальной защиты. Поверхностная плотность исследованной в настоящей работе защитной структуры: керамика — 8,53 кг/м²; подложка из сверхвысокомолекулярного полиэтилена — 10,67 кг/м²; защитный арамидный пакет — 1,12 кг/м²; монтажная пленка — 0,60 кг/м². В целом поверхностная плотность защитной структуры составляет 20,9 кг/м², что позволяет получить защитную панель класса Бр4 стандартной площадью 7,5 дм² и массой менее 1,6 кг.

Выводы

Представленная работа рассматривает новый тип композиционной керамики на основе алмазных частиц с уникальной трижды периодической микроструктурой и провести оценки использования ее в качестве бронезащиты. Композиционный материал алмаз-карбид кремния («Идеал») получен пропиткой жидким кремнием пористой заготовки из алмазных частиц. Регулирование концентрации компонентов, температуры процесса пропитки, давления среды и т.д. позволяет реализовать реакционно-диффузионный механизм Тьюринга (синтеза и роста «забора» Тьюринга — кристаллов карбида кремния на частицах алмаза) и получить материал с регулярной (периодической) микроструктурой. Материал «Идеал», по сравнению со стандартными реакционно-спеченными материалами на основе SiC и В4С, характеризуется наивысшими механическими характеристиками (выше только у монокристаллического алмаза).

Защитная конструкция, состоящая из керамической плитки («Идеал») и пластины из

сверхвысокомодульного полиэтилена испытывалась при обстреле из автомата АК-103 калибра 7,62 мм пулями ПС со стальным термоупрочнённым сердечником, патрона инд. 57-Н-231, а также автомата АК-74 с патронами инд. 7Н10, пульей ПП со стальным термоупрочнённым сердечником, все образцы выдержали испытание. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности новой керамики и возможности создания на ее основе защитных композитных панелей с уникально низкой поверхностной плотностью.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-73-30019 «Новые физические и химические принципы технологии металлических, металлокерамических и керамических материалов с управляемой макро-, микро- и наноструктурой и уникальными служебными характеристиками».

Литература

1. Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Маринин В.М., Чистяков Е.Н. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования — Москва: РадиоСофт. 2008. 406 с.
2. Анастасиади Г.П., Сильников М.В. Работоспособность броневого материалов. — СПб: Астерион. 2004. 624 с.
3. Paul J. Hazel. Armour. Materials, Theory and Design. CRC Press. 2015. P. 395.
4. Rosenberg Z., Dekel E. Terminal Ballistics — Springer Berlin Heidelberg. Berlin. Heidelberg. 2012.
5. Зайцев Г.П. Корундовая бронекерамика: опыт производства и применения // Экспертный союз. 2012. № 3 (24).
6. Nesmelov D.D., Perevislov S.N. Reaction sintered materials based on boron carbide and silicon carbide // Glass and Ceramics. 2015. V. 71. № 9–10. P. 313–319.
7. Анискович В.А., Маркелов Е.Б. Комбинированная броня на основе керамики-композитных материалов. — М.: «Граница». 2018. 272 с.
8. Shevchenko V.Y., Perevislov S.N., Ugolkov V.L. Physicochemical interaction processes in the carbon (diamond)–silicon system // Glass Physics and Chemistry. 2021. V. 47. № 3. P. 197–208.
9. Shevchenko V.Ya., Oryshchenko A.S., Perevislov S.N., Silnikov M.V. About the criteria for the choice of materials to protect against the mechanical dynamic loading // Glass Physics and Chemistry. 2021. V. 47. № 4. P. 281–288.
10. Shevchenko V.Ya., Perevislov S.N. Reaction–diffusion mechanism of synthesis in the diamond–silicon carbide system // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2021. V. 66. № 8. P. 1107–1114.
11. Ковальчук М.В., Орыщенко А.С., Шевченко В.Я. и др. Пат. № 2731703. 2020. Заявка № 2019136844 от 15.11.2019.
12. Ковальчук М.В., Орыщенко А.С., Шевченко В.Я. и др. Пат. № 2732258. 2020. Заявка № 2019143480 от 19.12.2019.
13. Khmelnsky R.A., Gippius A.A. Transformation of diamond to graphite under heat treatment at low pressure // Phase Transitions. 2014. V. 87. № 2. P. 175–192.
14. Turing A. The chemical basis of morphogenesis // Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. B. 1952. V. 237. № 641. P. 37–72.
15. Shevchenko V.Y., Kovalchuk M.V., Oryshchenko A.S., Perevislov S.N. New chemical technologies based on Turing reaction–diffusion processes // Doklady Chemistry. Pleiades Publishing. 2021. V. 496. № 2. P. 28–31.
16. I.G. Grouch, Ed. The science of armour materials. Woodhead Publishing. 2016. P. 754
17. Savio S.G., Ramanjaneyulu K., Madhu V. et al. An experimental study of ballistic performance of boron carbide tiles // Int. J. Impact Eng. 2011. V. 38. № 7. P. 535–541.
18. Partom Y., Littlefield D.L. Validation and calibration of a lateral confinement model for long-rod penetration at ordnance and high velocities // International journal of impact engineering. 1995. V. 17. № 4–6. P. 615–626.
19. I.G. Crouch. Body armour — New materials, new systems // Defence Technology. 2019. V. 15. P. 241–253.
20. Сильников М.В., Гуменюк В.И., Тарабанов В.Н. Нанотехнологии в средствах индивидуальной и коллективной защиты // Вопросы оборонной техники. Серия 16. 2015. № 3–4 (81–82). С. 11–16.
21. Сильников М.В., Сильников Н.М., Спивак А.И., Барков Д.Д. Разработка пулестойкого материала из баллистической ткани за счет многоступенчатой обработки химическими составами // Вопросы оборонной техники. Серия 16. 2020. № 3–4 (141–142). С. 135–139.