

УДК: 623.241, 623.445

DOI: 10.53816/20753608_2021_4_87

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ НОВОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА «ИДЕАЛ»

INVESTIGATION OF THE PROTECTIVE PROPERTIES OF THE NEW CERAMIC MATERIAL «IDEAL»

**В.Я. Шевченко¹, академик РАН М.В. Сильников², А.С. Долгин¹, М.М. Сычев^{1,3},
С.Н. Перевислов¹, чл.-корр. РАН А.И. Михайлин², Н.М. Сильников²**

¹Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,
²АО «НПО Спецматериалов», ³СПб ГТИ(ТУ)

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

Проведены баллистические испытания защитных свойств нового перспективного керамического материала «Идеал» на основе алмазных частиц по сравнению с известным керамическим материалом — корундом. При обстреле пулями Б-32 со стальным теплоупрочненным (ТУ) сердечником калибра 12,7 мм. Показано, что материал «Идеал» обеспечивает существенно лучшие баллистические защитные свойства при меньшей поверхностной плотности.

Ключевые слова: защитные свойства, композиционный материал «Идеал», корунд, карбид кремния, баллистическая стойкость.

Ballistic tests of the protective properties of the new promising ceramic material “Ideal” based on diamond particles were carried out in comparison with the well-known ceramic material alumina when fired with B-32 bullets with a steel API bullets of 12.7 mm caliber. It is shown that the material «Ideal» provides significantly better ballistic protective properties at a lower surface density.

Keywords: protective properties, composite material «Ideal», alumina, silicon carbide, ballistic resistance, composite armour.

Введение

Керамические материалы стали неотъемлемой частью современных конструкций для защиты подвижных объектов от баллистических воздействий. Применение керамики позволило значительно снизить поверхностную плотность защитных структур, что особенно важно в авиастроении и в средствах индивидуальной защиты [1–5].

Современные пули легкого стрелкового оружия имеют сердечник высокой твердости и встречают преграду со скоростями 700–900 м/с.

В качестве материала сердечника выступают высокопрочные термоупрочненные стали, высокоплотные тугоплавкие сплавы на основе карбида вольфрама, вольфрама или урана [6].

Взаимодействие таких пуль с керамической преградой включает затупление кончика ударника и его эрозию, распространение волн напряжения, их суперпозицию и образование трещин в керамическом слое, дробление керамики в зоне нагружения [1, 7].

При взаимодействии с ударником в керамике образуются ударные волны сжатия, которые,

дойдя до границы раздела керамики с подложкой, отражаются в виде волн растяжения. Одновременно, перпендикулярно направлению удара, в керамике распространяются волны сдвига, которые инициируют ее разрушение [7]. Скорость распространения волн напряжения в керамике может быть в 3 раза больше чем в стали и достигать 15 км/с [8]. Механизм разрушения такой преграды детально обсуждается в [7].

В табл. 1 представлены физико-механические характеристики наиболее распространенных керамических защитных материалов: реакционно-спеченных карбида кремния, горячепрессованного карбида бора [9], жидкофазно-спеченного карбида кремния [10], а также нового перспективного композиционного материала «Идеал» [11, 12].

Накопленный к настоящему времени экспериментальный материал свидетельствует о том, что уровень баллистических защитных свойств керамики зависит от оптимального сочетания механических свойств [13–15].

Одной из важнейших характеристик бронекерамики является твердость. При ударе пули о преграду в области их контакта возникает контактное давление. Для того, чтобы пуля проникла в преграду необходимо, чтобы это давление было выше, чем твердость преграды. Термупрочненные стальные сердечники современных пуль имеют твердость на уровне 64–68 HRC (твердость по Викерсу HV порядка 0,1 ГПа), что выше, чем у броневых сталей, твердость которых обычно не превышает 52–56 HRC. В то же время керамические материалы, используемые в

бронезащите, такие как корунд, карбид кремния и карбид бора, обладают в сотни раз большей твердостью. Высокая твердость керамической преграды обеспечивает разрушение и эрозию стального сердечника. При этом уменьшается масса и скорость сердечника, и возрастает площадь контакта с преградой, что, в свою очередь, приводит к дополнительной диссипации кинетической энергии сердечника в объеме материала преграды. Время задержки, в течение которого не происходит проникания ударника в преграду, возрастает при повышении твердости и служит важной интегральной характеристикой баллистической стойкости керамического материала [16].

Второй важной механической характеристикой бронекерамики является трещиностойкость, характеризующая коэффициентом K_{IC} . Повышение трещиностойкости увеличивает долю кинетической энергии ударника, рассеянной керамическим слоем, и повышает живучесть защитной структуры при многократных воздействиях. Трещиностойкость и твердость по-разному зависят от микроструктуры материала. Это приводит к тому, что для керамики наблюдается обратно пропорциональная зависимость твердости от трещиностойкости [14]. Тем не менее, для достижения высокой баллистической стойкости необходимо обеспечить высокий уровень обеих характеристик.

Зарождение трещин в керамике происходит в местах локализации максимальных растягивающих напряжений, вызванных изгибом керамического слоя под действием распространяющихся в нем ударных волн. Чем выше у керамики прочность на изгиб, тем большие растягивающие

Таблица 1

Механические свойства материалов на основе SiC, B₄C, Al₂O₃ и «Идеал»

Материал	Плотность ρ , г/см ³	Модуль упругости E , ГПа	Прочность при изгибе σ	Коэффициент трещиностойкости K_{IC} , МПа·м ^{1/2}	Твердость по Виккерсу HV, ГПа
SiSiC	3,10	329	400	3,5	21
LPSSiC	3,25	358	520	5,5	21
HPB ₄ C	2,75	431	450	3,8	32
Al ₂ O ₃	3,8	360	350	3,4	16
Композит алмаз-карбид кремния («Идеал»)	3,35	754	420	4,5	65

SiSiC — реакционно-спеченный карбид кремния; LPSSiC — жидкофазно-спеченный карбид кремния; HPB₄C — горячепрессованный карбид бора; Al₂O₃ — спеченный корунд.

напряжения она выдерживает до момента зарождения трещины. Соответственно, возрастает и время задержки проникания ударника, и общая доля энергии, рассеянной керамическим слоем.

Модуль упругости керамики E определяет её жесткость, а значит и скорость упругих волн, рассеивающих энергию удара по объему керамики. Кроме того, повышение жесткости позволяет керамике лучше противостоять изгибным напряжениям, возникающим вблизи точки удара и приводящим к растрескиванию керамики. Поэтому увеличение величины модуля упругости должно благотворно влиять на баллистическую стойкость керамики. При этом следует учитывать, что с ростом модуля растёт и акустический импеданс материала, что, в свою очередь, влияет на взаимодействие керамического слоя с ударником и подложкой.

К важнейшим механическим характеристикам материалов относится предел прочности. Однако для керамических материалов, в отличие от металлических, этот параметр, при прочих равных, оказывает незначительное влияние на эффективность баллистической защиты [17, 18].

Оценка эффективности баллистической защиты невозможна в отрыве от её весовых характеристик. Уровень баллистической защиты той или иной структуры характеризуется её поверхностной плотностью при условии обеспечения требуемой защиты. Соответственно, плотность керамики также входит в число важнейших характеристик.

Все перечисленные характеристики различных керамических материалов приведены в табл. 1.

Корунд, карбид кремния и карбид бора являются основными материалами, используемыми в настоящее время для создания органо- и металло-керамических защитных структур. Вместе с тем, идет настойчивый поиск альтернативных керамических материалов, с помощью которых возможно повышение баллистической стойкости, таких как карбид циркония [19], нитрид циркония [20], волокнистые композиты с керамической матрицей [21], керамические композиты карбид бора — карбид кремния — кремний [4].

В [7, 8] предложен принципиально новый подход, основанный на идее использования керамики с регулярной микроструктурой, сформированной в результате реакционно-диффузион-

ных превращений Тьюринга в бронематериале нового поколения — алмаз-карбидкремниевом структурно-упорядоченном композите «Идеал». В структуре композита грани монокристаллов алмаза когерентно связаны с кристаллической решеткой карбида кремния, что обеспечивает сочетание уникально высоких твердости и модуля упругости, присущих алмазу, с уровнем трещиностойкости, характерным для карбида кремния.

По данным из табл. 1 можно сделать вывод, что сочетание высоких механических свойств, присущее композиту «Идеал», делают возможным достижение высоких уровней баллистической защиты. Экспериментальное подтверждение этого тезиса было получено в [22] на основании результатов обстрела образцов органо-керамической защиты с керамикой «Идеал» пулями калибра 7,62 мм и 5,45 мм с термоупрочненным сердечником.

Целью настоящей работы являлась проверка защитных свойств керамики «Идеал» в составе органо-керамических защитных бронепанелей при обстреле пулями с термоупрочненным сердечником калибра 12,7 мм.

Защитные керамические бронепанели представляют собой преграду многослойной структуры, включающую [6]:

- защитный поверхностный слой из арамидной ткани;
- керамические плитки;
- тонкий адгезионный слой, обеспечивающий надежное соединение керамики с материалом подложки;
- подложка в виде металлического листа или компактированной арамидной ткани или сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

Выбор материалов для защитного блока и детали конструкции определяются требуемым уровнем защиты и условиями эксплуатации. Так, металлические подложки лучше обеспечивают защиту от множественных воздействий, но тяжелее полимерных; линейные размеры и толщина керамических плиток зависят от требуемого уровня защиты; толщина и материал защитного поверхностного слоя связаны с требованием подавления рикошета и т.д.

При соударении с керамикой ударная волна, исходя из центра удара, по окружностям распространяется в глубь керамики, вызывая большое количество трещин, которые образу-

ются на дефектных участках зерен материала, формируя в керамике, так называемые, «обратные конусы Герца» [23]. Амплитуда ударной волны [7, 24] определяется давлением и скоростью движения ударника. При больших ударных воздействиях (высокой скорости) происходит деформационный сдвиг слоев керамики в зоне действия ударной волны, что приводит к сдвигу слоев материала к центру контакта ударника с керамикой. Ударная волна частично гасится на деформацию ударника о керамику; прохождение ударной волны в керамике, отражение ударных волн (растягивающие волны) от тыльной поверхности керамики. Сила отраженной волны на выходе значительно (в 3–4 раза) меньше силы начальной ударной волны. При отражении волн идет разгрузка материала (растяжение слоев). Хрупкие материалы, к которым относится композит «Идеал», обладают высокими механическими характеристиками (табл. 1), что определяет высокое поглощение ими энергии ударной волны и, соответственно, низкие значения запреградной деформации (малая выпуклость с тыльной стороны подложки).

Методы исследования

Оценку свойств преграды осуществляли в соответствии с ГОСТ Р 50744-95.

Определение кажущейся плотности проводили по ГОСТ 2409-95. Насыщение образцов водой производили при помощи кипячения в воде в течение 3 ч. Взвешивание производили на аналитических весах с точностью до 0,001 г.

Расчет плотности проводили по формуле:

$$\rho_k = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_l,$$

где ρ_k — кажущаяся плотность, г/см³;

m_1 — масса сухого образца, г;

m_2 — масса образца, погруженного в жидкость, г;

m_3 — масса насыщенного жидкостью образца, г;

ρ_l — плотность насыщающей жидкости при температуре испытаний, г/см³.

Твердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 с алмазной пирамидой Виккерса при нагрузке 1,962 Н по ГОСТ 9450-76. Среднее значение

получали по результатам 10 измерений на различных участках шлифованной поверхности образца.

Определение трещиностойкости осуществляли методом индентирования полированных образцов при нагрузке 5 кг на алмазную четырехгранную пирамидку. Предел прочности на изгиб определяли в соответствии с ГОСТ 310.4-81.

Модуль упругости и скорость звука определяли резонансным методом акустического контроля частоты собственных колебаний на приборе «Звук-130».

Изучение фазового состава образцов до и после отстрела проводили методом рентгеновского анализа на дифрактометрах Rigaku Smartlab 3.

Микроструктура осколков и элементный анализ изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Vega 3 SBH с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) AZtec X — Act.

Методика изготовления защитных конструкций

Новый перспективный керамический материал «Идеал» сравнивали с корундом (Al₂O₃). Корундовые плитки изготавливали по стандартной керамической технологии:

1) сухое смешение оксида алюминия со спекающими добавками (Ti и Mn); увлажнение исходных компонентов (95 мас. % керамического порошка и 5 мас. % временной технологической связки — 5 % водный раствор ПВС); гранулирование влажного материала, перетиранием его через сито с размером ячеек 200 мкм;

2) прессование из шихты образцов в металлической пресс-форме при давлении 100 МПа, с выдержкой при максимальном давлении 10 с;

3) сушка прессовок при 80–90 °С в течении 6–8 ч в сушильном шкафу;

4) спекание прессовок при температуре 1500 °С, со скоростью нагрева 5 °С/мин с выдержкой при максимальной температуре 2 ч.

Для получения композиционного материала «Идеал» использовали следующие технологические операции:

1) сухое смешивание алмазных порошков марки АС160 фракции 250/200 (60 мас. %) и 28/20 (40 мас. %) в шаровой мельнице с карбид кремниевыми мелящими телами в течение 2 ч; смешивание порошков со спиртовым раствором

фенолформальдегидной смолы; сушка шихты на воздухе; гомогенизация шихты методом гранулирования;

2) формование образцов осуществляли на гидравлическом прессе при давлении 100 МПа, в течение 10 с;

3) сушку заготовок осуществляли на воздухе в течение 8 ч при максимальной температуре 120 °С;

4) заготовки для силицирования размещали в графитовых контейнерах с применением графитизированной бумаги (защищающих графитовую оснастку печи от протекания жидкого кремния) — стенки графитовых контейнеров обмазывали 10 % суспензией нитрида бора в этиловом спирте и сушили на воздухе до полного высыхания. Заготовки образцов обсыпали необходимым количеством кремния, затем помещали в печь для высокотемпературной обработки, после чего извлекали детали из печи;

5) после термообработки проводили пескоструйную обработку деталей от технологических загрязнений.

Для изготовления защитных конструкций на подложку приклеивали керамические плитки со смещением ряда, чтобы избежать образования четверных стыков. Схема размещения керамических плиток в защитной конструкции показана на рис. 1. Подложка толщиной 20 мм была изготовлена из арамидной ткани Тварон, компактированной с помощью высокопрочной полимерной пленки. Для улучшения свойств защиты конструкцию запаковывали в пакет из четырех слоев арамидной ткани Тварон.

Состав конструкции включал керамические плитки размером 65×65 мм. В первом варианте использовали корундовую плитку толщиной 14 мм, а во втором — плитку из керамики «Идеал» толщиной 13,5 мм.

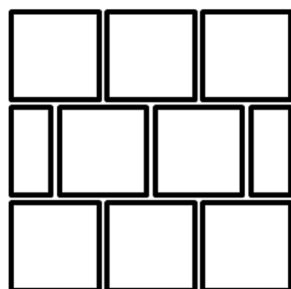


Рис. 1. Схема укладки керамических плиток в защитной конструкции

Экспериментальные результаты

Оценку защитных свойств осуществляли в соответствии с ГОСТ Р 50744-95.

Испытания конструкции по классу Брб проводили в Испытательном Центре АО «НПО Специальных материалов» (г. Санкт-Петербург). Конструкцию подвергали обстрелу с дистанции 2,5 м из винтовки ОСВ-96 калибра 12,7 мм патронами инд. 57-БЗ-542 с пулей Б-32 со стальным ТУ сердечником со скоростью 800–830 м/с.

Поскольку дистанция обстрела была меньше, чем полагает ГОСТ Р 50744-95, угол подхода ударника к поверхности образца дополнительно контролировали с помощью картонных экранов. Во всех случаях воздействие ударника было проведено по нормали к поверхности образца, что соответствует требованиям ГОСТ Р 50744-95. Был произведен 1 выстрел в каждую конструкцию.

Картина разрушения для исследованных типов керамики представлена в табл. 2. По данным табл. 2 можно сделать вывод, что, доля разрушенных плиток при испытаниях для образца с керамикой «Идеал» оказалось вдвое меньше, чем для корунда.

Характер повреждения подложки для двух типов керамики отличается. Для корунда глубина проникновения ударника в подложку оказалась существенно больше — 15 мм по сравнению с 7 мм для керамики «Идеал». Это сказывается и на размерах выпучин, образовавшихся на тыльной стороне подложки: в случае корундовой керамики диаметр выпучины немного меньше, а её объем больше, чем для керамики «Идеал» (табл. 3).

Результаты исследований фазового состава образцов керамики «Идеал» до и после нагружения представлены на рис. 2. Изменений в кристаллической структуре фаз, составляющих матрицу композита, а именно кремния и его карбида, не обнаружено. Наблюдаемое уменьшение содержания кремния может быть обусловлено характером собранных осколков. Кремний, в основном, присутствует в самых мелких фракциях (пылеобразных).

В табл. 2 представлены также фотографии осколков двух типов керамики, собранных после испытаний. Как видно на фотографиях, для керамики «Идеал» характерны меньший объем осколков по сравнению с корундом, а также наличие крупных фрагментов.

Таблица 2

Фото защитных конструкций после испытаний

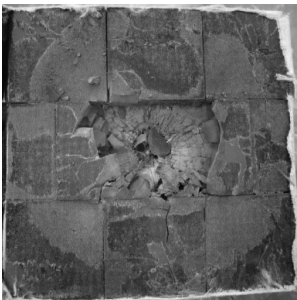
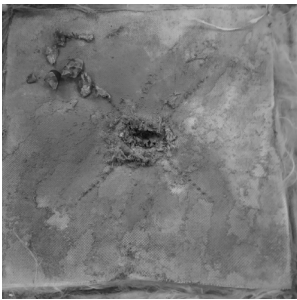
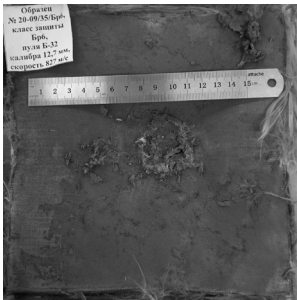
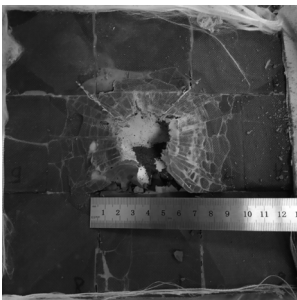
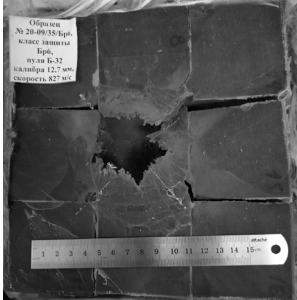
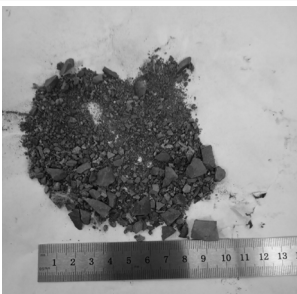
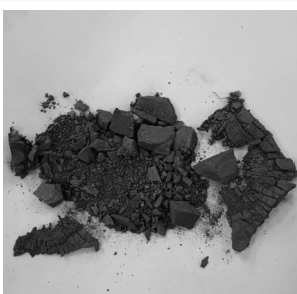
	Керамический слой корунд	Керамический слой «Идеал»
Вид со стороны обстрела		
Каверна разрушения		
Вид сзади (защитная конструкция)		
Вид сзади (керамический слой)		
Осколки керамики		

Таблица 3

Результаты баллистических испытаний

Параметр	Керамический слой корунд	Керамический слой «Идеал»
Подложка	Компактированная арамидная ткань (Тварон, 20 мм)	Компактированная арамидная ткань (Тварон, 20 мм)
Керамическая плитка	Корунд	«Идеал»
Размер керамических плиток, мм	65×65×14	65×65×13,5
Пробитие / непробитие	Непробитие	Непробитие
Скорость ударника, м/с	819	827
Количество повреждённых плиток	4 плитки	2 плитки
Глубина проникновения в подложку, мм	15	7
Диаметр выпучины на тыльной стороне подложки, мм	160	170
Объём выпучины, мл	282	250

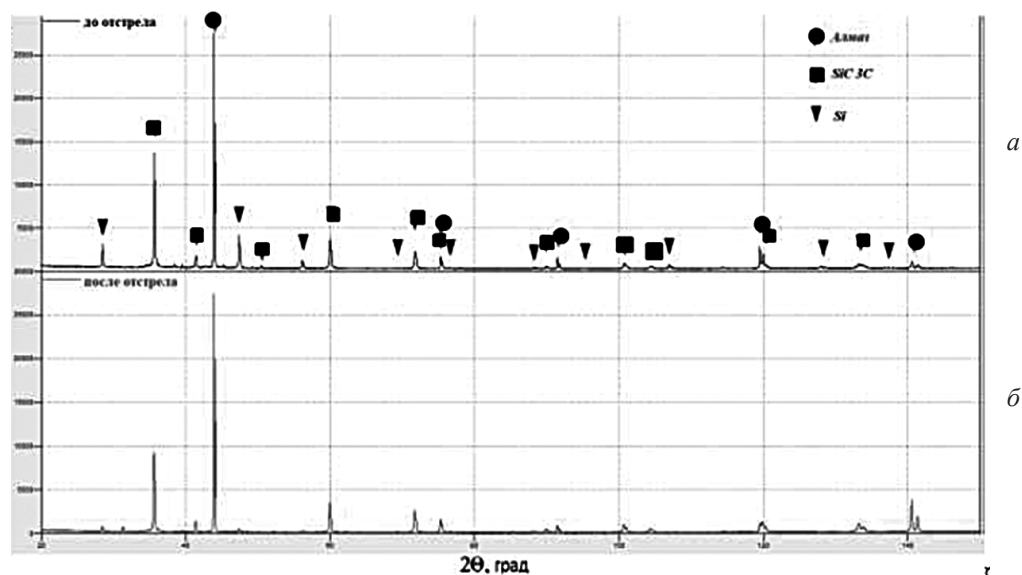


Рис. 2. Дифрактограмма композиционного материала «Идеал» до обстрела (а) и после обстрела (б) ● — алмаз, ■ — SiC 3C, ▼ — Si

Для количественной оценки выявленных отличий было проведено измерение фракционного состава осколков. Результат представлен на рис. 3. Как видно на рисунке, массовые доли пылеобразных фрагментов с размерами 0–0,25 мм для двух типов керамики близки. С увеличением размера фрагментов до 5 мм нарастает расхождение в массовой доле, и для интервала размеров фрагментов 1–5 мм их массовая доля для корунда оказывается вдвое больше, чем для керамики «Идеал». Для крупных фрагментов размером больше 5 мм наблюдается обратная картина — массовая доля таких фрагментов для корунда оказывается вдвое ниже, чем для керамики «Идеал».

Для структуры керамики «Идеал» характерно наличие кристаллов алмаза различного размера в матрице из карбида кремния. Фрактографическое исследование поверхности фрагментов керамики «Идеал» показало, что в образцах превалирует разрушение по матрице (рис. 4). Однако наблюдалось также и транскристаллитное разрушение композита «Идеал» (рис. 4). Это означает, что адгезия на границе раздела компонентов композита «Идеал» достаточно высокая.

Обсуждение результатов

Отличия фракционного состава осколков двух материалов керамических плиток (рис. 4) говорят

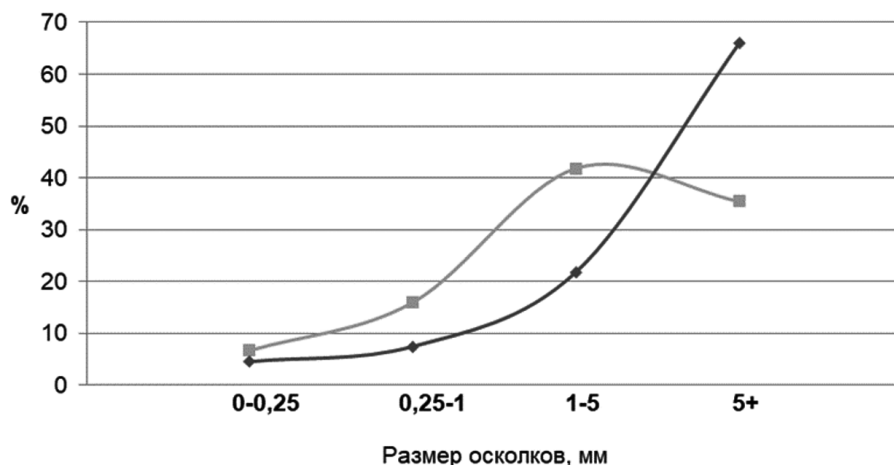


Рис. 3. Фракционный состав осколков керамических плиток после отстрела — массовая доля осколков различного размера, ■ — Al_2O_3 , ♦ — «Идеал»

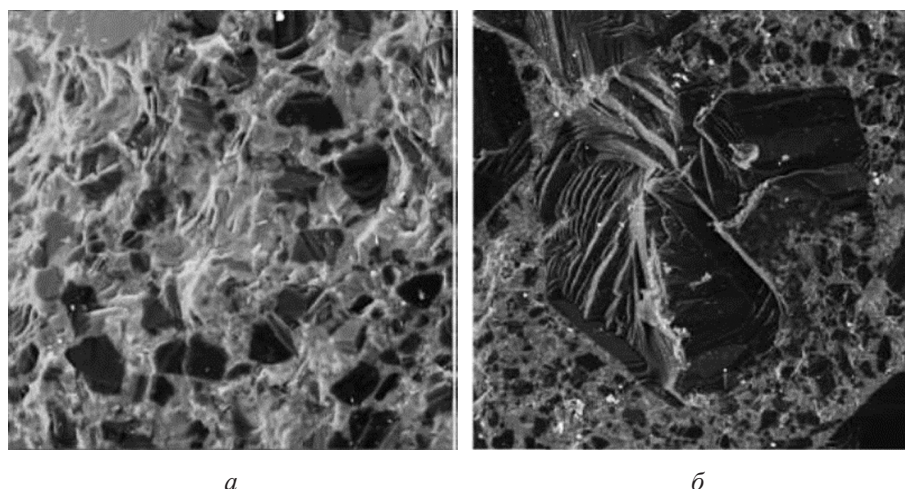


Рис. 4. Фрактограмма керамики «Идеал» после отстрела

о том, что суммарная поверхность разрушения для керамики «Идеал» оказывается меньше, чем для корунда. Это объясняется более высокой прочностью керамики «Идеал». В результате изменяется баланс энергии при воздействии индентора — на разрушение керамики «Идеал» идет меньшая доля энергии индентора, чем в случае корунда.

В то же время, глубина проникновения в подложку и деформация подложки для керамики «Идеал» оказались меньше, чем для корунда (табл. 3). Поскольку при испытаниях использовались идентичные подложки, можно сделать вывод о том, что доля энергии индентора, поглощенная подложкой, в случае корунда была выше, чем для керамики «Идеал». Иными словами, слой корунда взял на себя меньшую долю энергии индентора, чем слой керамики «Идеал».

Эти два наблюдения позволяют сделать вывод о том, что керамика «Идеал» обеспечивает эффективное рассеяние кинетической энергии индентора по всему объему образца, а не только вблизи точки воздействия индентора. При этом уровень сдвиговых и растягивающих напряжений даже в соседних керамических плитках не превышает предела прочности керамики и не приводит к её разрушению.

Выявленные отличия в характере разрушения двух типов керамики являются следствием отличия в их механических свойствах: керамика «Идеал» обладает более высоким модулем упругости и более высокой твердостью по сравнению с корундом.

В результате, процессы рассеяния кинетической энергии индентора в керамике «Идеал» сме-

щаются в упругую область. Можно ожидать, что они будут тем эффективнее, чем больше акустический импеданс подложки и компаунда, склеивающего отдельные плитки, а также при переходе от квадратных плиток к шестиугольным.

Наряду с оптимальным выбором материала керамического слоя, важную роль играет оптимизация материала подложки. Подложка должна обладать высокой прочностью и энергоемкостью для того, чтобы погасить кинетическую энергию остатков ударника и движущихся вместе с ними фрагментов керамики. Вместе с тем, подложка должна иметь акустический импеданс, согласованный с импедансом керамики, для того, чтобы оптимизировать долю энергии отраженной и проходящей в подложку ударной волны. На практике в качестве подложки используют алюминиевый сплав, например АМГ6 или компактированную арамидную ткань, а также прессованные UD материалы, такие как сверхвысокомолекулярный полиэтилен или арамид [1, 13, 25, 26].

Поверхностная плотность керамического защитного слоя для керамики «Идеал» равна 45,9 кг/м², а для корунда — 53,2 кг/м², то есть керамика «Идеал» дает выигрыш по массе в 16 % и при этом, судя по параметрам тыльных повреждений, обладает большим запасом баллистической стойкости.

Выводы

Керамический материал «Идеал» обеспечивает лучшую защиту, чем корунд: глубина проникновения сердечника меньше, а осколки керамики крупнее. Это говорит о том, что энергия проникающего тела в большей степени тратится на разрушение его самого, чем на разрушение преграды. При этом количество разрушенных плиток меньше в два раза, т.е. существенно повышается живучесть защитной конструкции, позволяющая выдержать несколько выстрелов.

Испытания керамических конструкций из композиционного материала «Идеал» показали, что они обеспечивают защиту от средств поражения по классу защиты Бр6 в соответствии с ГОСТ Р 50744-95 при поверхностной плотности 60 кг/м².

Изготовление плиток из материала «Идеал», изучение их свойств, изготовление конструкции и испытание ее защитных свойств выполне-

но при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-13-00054).

Изготовление корундовых керамических плиток и изучение их свойств выполнено в рамках госзадания АААА-А19-119022290092-5.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда в рамках научного проекта № 21-73-30019.

Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием «Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов» НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей».

Литература

1. Crouch J.G. Introduction to armor materials. The Science of Armor Materials. 2017. Elsevier. Part I. P. 33.
2. Сильников М.В., Химичев В.А. Средства индивидуальной бронезащиты. Санкт-Петербургский университет МВД РФ, Академия права, экономики и безопасности жизнедеятельности. — СПб: Фонд «Университет». 2000. 480 с.
3. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Материалы и структуры легкой бронезащиты. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. 191 с.
4. Анискович В.А., Маркелов Е.Б. Комбинированная броня на основе керамики-композитных материалов. — М.: «Граница». 2018. 272 с.
5. Легкие баллистические материалы. Ред. А. Бхатнагар. — Москва: Техносфера. 2011. 392 с.
6. Hazell P.J. Armor. Materials. Theory. Design. CRC Press. 2016. P. 231.
7. 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.
8. Shevchenko V.Ya., 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.
9. 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.

10. Perevislov S.N., Pantelev I.B., Shevchik A.P., Tomkovich M.B. Microstructure and mechanical properties of SiC-materials sintered in the liquid phase with the addition of a finely dispersed agent // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. V. 58. № 5. P. 577–582.
11. Shevchenko V.Y., Perevislov S.N., Ugolkov V.L. Physicochemical interaction processes in the carbon (diamond)–silicon system // *Glass Physics and Chemistry*. 2021. T. 47. № 3. C. 197–208.
12. 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.
13. Анастасиади Г.П., Сильников М.В. Работоспособность броневых материалов. — СПб: Астерион. 2004. 624 с.
14. Dresch A.B., Venturini J., Arcaro S., Montedo O.R.K., Bergmann C.P. Ballistic Ceramics and Analysis of their Mechanical Properties for Armour Applications: A Review, *Ceramics International*, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.095>.
15. Karandikar P.G., Evans G., Wong S., Aghajanian M.K., Sennett M. A Review of Ceramics for Armor Applications, in: 2009. Pp. 163–175. <https://doi.org/10.1002/9780470456286.ch16>
16. 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.
17. Anderson C.E. (2002). Developing an ultra-lightweight armor concept. In: *Ceramic Armor Materials by Design: Ceramic Transactions* (eds. J. McCauley et al.), 485–498. The American Ceramic Society.
18. Bavdekar S., Parsard G., Subhash G., Satapathy S. (2017). An improved dynamic expanding cavity model for high-pressure and high-strain rate response of ceramics. *International Journal of Solids and Structures* 125: P. 77–88.
19. Savio S.G., Madhu V., Gogia A.K. Ballistic performance of alumina and zirconia-toughened alumina against 7.62 armour piercing projectile, *Def.Sci. J.* 64 (2014). P. 464–470.
20. Nahme H., Hohler V., Stilp A. Determination of the dynamic material 23. Properties of shock loaded silicon-nitride, in: *AIP Conf. Proc.*, AIP, 1994. P. 765–768.
21. Swab J.J., Sandoz-Rosado E. Opportunities in the Development of Ceramic Matrix Composite (CMC) Materials for Armor Application. 2017. Report number: ARL TR-7987. <https://www.researchgate.net/profile/Emil-Sandoz-Rosado>
22. Сильников М.В., Шевченко В.Я., Михайлин А.И., Перевислов С.Н., Сильников Н.М. 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 // *Известия Российской Академии ракетных и артиллерийских наук*. 2021. № 3 (118). С. 107–113.
23. Шевченко В.Я., Изотов А.Д., Лазарев В.Б., Жаворонков Н.М. Энергия диссоциации и предельная упругая деформация в модели двухчастичного взаимодействия // *Неорганические материалы*. 1984. Т. 20. № 6. С. 1047–1052.
24. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударно-волновое явление в конденсированных средах. — М.: Изд-во «Янус-К». 1996. 408 с.
25. Сильников М.В., Гуменюк В.И., Тарабанов В.Н. Нанотехнологии в средствах индивидуальной и коллективной защиты // *Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму*. 2015. № 3–4 (81–82). С. 11–16.
26. 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: Технические средства противодействия терроризму*. 2020. № 3–4 (141–142). С. 135–139.