

**БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ОРГАНОКЕРАМИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ
НА ОСНОВЕ КЕРАМИКИ «ИДЕАЛ»**

**BALLISTIC TESTING OF ORGANIC CERAMIC PANELS BASED
ON «IDEAL» CERAMICS**

*Канд. техн. наук Н.М. Сильников, Н.М. Юрченко, д-р техн. наук А.И. Михайлин,
канд. техн. наук И.В. Гук*

Ph.D. N.M. Silnikov, N.M. Yurchenko, D.Sc. A.I. Mikhaylin, Ph.D. I.V. Guk

АО «НПО Спецматериалов»

Проведена разработка новых композиционных пулестойких структур с рекордно низкой поверхностной плотностью на основе алмазосодержащей карбидокремниевой керамики «Идеал». Разработан метод испытаний перспективных образцов бронеструктур с применением металлической рамки, ограничивающей свободные боковые поверхности керамической плитки. Преимущество данного метода заключается в использовании минимального количества керамики при сохранении защитных свойств образца бронеструктуры. Разработанные структуры обладают рекордно низкой поверхностной плотностью. Для образцов, соответствующих классу защитной структуры Бр5, это значение составляет 30,24 кг/м², а для соответствующих классу Бр6 — 63,48 кг/м².

Ключевые слова: керамика «Идеал», импеданс, волны напряжений, защитные свойства, металлическая рамка, баллистические испытания, противопульная стойкость.

The development of new composite bullet-resistant structures with a record low surface density based on diamond-containing silicon carbide ceramics «Ideal» has been carried out. A method has been developed for testing promising samples of armored structures using a metal frame that limits the free side surfaces of ceramic tiles. The advantage of this method lies in the use of a minimum amount of ceramics while maintaining the protective properties of the armor structure sample. The developed structures have a record low surface density. This value for samples conforming to the protection class Br5 is 30,2 kg/m², and for those conforming to the class Br6 — 63,48 kg/m².

Keywords: «Ideal» ceramics, impedance, stress waves, protective properties, metal frame, ballistic tests, bullet resistance.

Введение

При разработке материалов для защиты от лёгкого стрелкового оружия важно обеспечение требуемого уровня защиты при минимальных массовых и габаритных характеристиках. В настоящее время для изготовления элементов броневой защиты широко используются балли-

стические материалы на основе органических волокон (параарамидные и полиэтиленовые волокна), металлические сплавы (броневая сталь, алюминиевые и титановые сплавы), а также броневая керамика [1–4].

Для защиты от высокоэнергетических средств поражения с термоупрочненными или твердосплавными сердечниками (Бр4, Бр5, Бр6 классы

защитной структуры по ГОСТ 34286-2017) широко применяются металлические и композиционные бронезащитные элементы, содержащие керамические материалы. Для изготовления металлической брони наиболее широко используются броневые стали. Такая защита обеспечивает оптимальное сочетание цены и качества. Так, стальная броня обеспечивает защиту по классу Бр4 при толщине бронепластины около 6 мм. Толщина стальной бронепластины для класса защитной структуры Бр5 составляет 11–13 мм, а ее масса при площади 10 дм² составляет 8,5–10 кг, что является нерациональным для использования в бронезиловых.

Твердость броневых сталей обычно лежит в пределах HRC 45...55. Такой твердости вполне достаточно, чтобы эффективно противостоять свинцовым пулям и пулям из незакаленной стали. Однако современные пули имеют, как правило, стальные термоупрочненные сердечники. В качестве материала таких сердечников используются высокотвердые термоупрочненные стали, закаленные до твердости HRC 64...67, а также металлокерамические твердые сплавы на основе карбида вольфрама [5]. Броневые стали уступают по твердости броневой бронезащитным сердечникам, что снижает баллистическую эффективность стальных бронепреград.

Снизить массу бронезащиты с сохранением ее защитных свойств можно, заменив традиционные монолитные стальные бронепластины на композитные бронезащитные элементы с лицевым керамическим

слоем [3, 6]. При производстве элементов высокого класса защитной структуры широко применяются керамические материалы на основе карбида бора B₄C, карбида кремния SiC, а также оксида алюминия Al₂O₃. В табл. 1 представлены физические и механические характеристики основных типов керамики.

В работах [7–9] рассмотрен новый тип реакционно-спеченного композиционного материала алмаз-карбид кремния «Идеал». Композит «Идеал» получен реакционным спеканием путем заполнения пор заготовки из алмазных частиц расплавом жидкого кремния до получения монолитной структуры. Прочную межфазную связь между карбидом кремния и алмазом подтверждает практически полное отсутствие пор в материале.

В результате образуется уникальная регулярная микроструктура материала, представляющая собой однородно распределенные по объему частицы алмаза естественной огранки. Синтез карбида кремния осуществляется при формировании объемных структур Тьюринга с топологией трижды периодических поверхностей минимальной энергии. Основные этапы метода получения композиционного материала «Идеал» описаны в [8]. Механические свойства композиционного материала алмаз-карбид кремния «Идеал» приближены к наблюдаемым у монокристаллического алмаза, и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физические и механические свойства керамических материалов и монокристалла алмаза [7, 9–11]

Материал	Плотность ρ, кг/м ³	Модуль упругости E, ГПа	Скорость звука, м/с	Коэффициент трещиностойкости K _{1C} , МПа·м ^{1/2}	Твердость HV, ГПа
Спеченный корунд Al ₂ O ₃	3750	375	9800	3,4	16
Реакционно-спеченный карбид кремния SiSiC	3100	329	10300	3,5	21
Жидкофазно-спеченный карбид кремния LPSSiC	3250	358	10500	5,5	21
Реакционно-спеченный карбид бора RSB ₄ C	2550	383	13000	3,5	30
Горячепрессованный карбид бора HPB ₄ C	2750	431	11800	3,8	32
Композит алмаз-карбид кремния «Идеал»	3350	754	15000	4,5	65
Монокристалл алмаза	3510	1000	17000	20	140

Важнейшими характеристиками броневой керамики, обеспечивающими защиту от высокоскоростных ударников, являются твердость, модуль упругости, а также трещиностойкость [4, 7, 10–13]. Высокая твердость керамики обеспечивает разрушение и эрозию сердечника, задерживая его проникание в керамическую преграду. Время этой задержки зависит от того, насколько твердость преграды выше твердости сердечника. Высокая скорость распространения ударных волн в преграде увеличивает эффективность рассеивания энергии удара по большей площади керамики, а также увеличивает объем повреждений сердечника. Высокий показатель трещиностойкости керамического материала свидетельствует о его способности рассеивать большую часть кинетической энергии ударника до начала хрупкого разрушения керамики.

Все эти характеристики должны иметь высокие значения для обеспечения максимальной баллистической эффективности. Однако на практике это трудно достижимо. Так, имеет место обратная пропорциональная зависимость твердости от трещиностойкости [7], что приводит к необходимости поиска компромиссных сочетаний свойств. Защитные характеристики композита «Идеал» являются наивысшими в сравнении с традиционными реакционно-спеченными материалами на основе карбида кремния и карбида бора [10]. Достигнуты в том числе и высокие значения характеристик твердости и трещиностойкости композита, что подтверждает его высокую баллистическую эффективность.

Проверка защитных свойств керамокомпозитных бронепанелей

Цель настоящей работы — проверка защитных свойств и эффективности образцов композитных бронеструктур, разработанных на основе керамического материала «Идеал». В работе проводились исследования защитных свойств образцов с единичной керамической плиткой, с плиткой, ограниченной металлической рамкой и полноразмерным керамическим слоем (рис. 1, а). Во всех случаях плитка имела форму квадрата со стороной 65 мм.

При взаимодействии с ударником в керамике формируются волны напряжения, распространяющиеся от точки удара по всему объему керамики. Волны напряжения, вызванные ударом, при достижении границы двух сред частично отражаются и проходят во вторую среду в зависимости от значений акустического импеданса Z [14]. В случае свободной поверхности волны сжатия отражаются от торцевой и боковых границ плитки в виде волн растяжения. Интерференция волн напряжения приводит к зарождению и росту трещин, и вызывает разрушение керамической плитки.

При обстреле структуры из нескольких соприкасающихся керамических плиток (рис. 1, б) волна сжимающих напряжений, дойдя до границы раздела, в основном передается в соседнюю плитку с тем же акустическим импедансом. Лишь при достижении свободной боковой поверхности крайней плитки, происходит отражение волны сжатия в виде волны растяжения.



Множественные отражения и увеличение длины пути, который проходят падающие волны напряжений, приводят к их затуханию.

Важным элементом при разработке структуры, состоящей из нескольких плиток, является клеевое связующее (адгезив), так как имеет место отражение и передача индуцированных волн напряжения на границах раздела керамика-адгезив и адгезив-керамика [15]. Можно ожидать, что защитная панель, состоящая из нескольких соприкасающихся керамических плиток, будет обладать существенно более высокой баллистической стойкостью по сравнению с изолированной керамической плиткой.

В [16] показано, что ограничение свободных поверхностей керамической плитки рамкой, выполненной из материала с близким к керамике акустическим импедансом, также повышает ее защитные свойства. В работе изучено влияние ограничения свободных боковых поверхностей керамики на остаточную глубину проникания в разных условиях — при отсутствии ограничения, при наличии стальной рамки, а также алюминиевой рамки. Во всех случаях были использованы керамические плитки из карбида бора B_4C одинаковой толщины и плотности. Средняя остаточная глубина проникания, полученная в [16] на плитках без ограничения свободных боковых поверхностей, оказалась выше на 19 %, чем при наличии алюминиевой рамки, и выше на 34 %, чем при

ограничении стальной рамкой. Это объясняется близким к керамике акустическим импедансом стали.

В настоящей работе при проведении испытаний на противоположную стойкость была применена металлическая рамка, ограничивающая свободные боковые поверхности керамической плитки (рис. 2). Рамка была выполнена в двух вариантах — из броневой стали RAMOR-500 и конструкционной стали Ст3. Эти стали имеют близкие значения плотности и акустического импеданса, но существенно отличаются по прочности. Близкие значения акустического импеданса керамики и стали позволяют повысить интенсивность передачи волн напряжения, приближая характер распространения ударных волн к описанному для полноразмерного керамического слоя из нескольких плиток (рис. 1, б). Значения акустического импеданса Z в керамике и материалах, используемых для изготовления металлической рамки, представлены в табл. 2. Акустический импеданс рассчитан как:

$$Z = \sqrt{E\rho} = \rho \cdot c.$$

Разработка и баллистические испытания бронеструктур на основе керамики «Идеал»

Для проверки защитных свойств бронеструктур на основе керамики «Идеал» были изготовле-

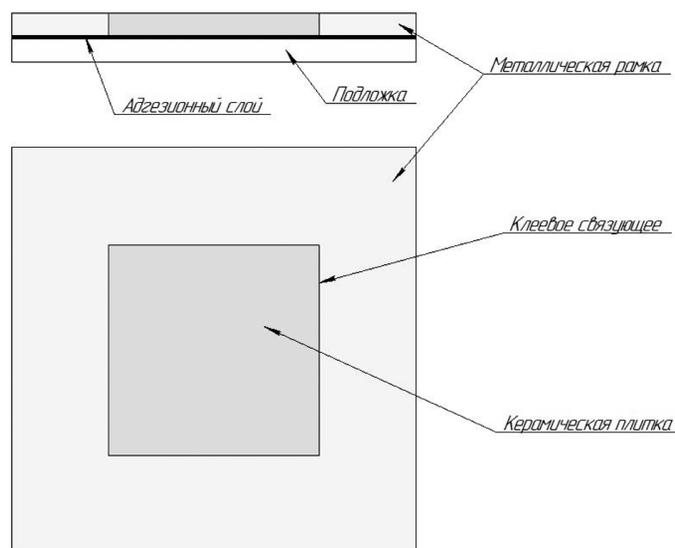


Рис. 2. Схема образца композитной структуры с металлической рамкой

Значения акустического импеданса в материалах

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Скорость звука c , м/с	Акустический импеданс Z , Па·с/м
Композит «Идеал»	3350	15000	$5025 \cdot 10^4$
Броневая сталь RAMOR-500	7650	5240	$4010 \cdot 10^4$
Конструкционная сталь Ст3	7850	5170	$4060 \cdot 10^4$

ны образцы, соответствующие классам защитной структуры Бр5 и Бр6 следующих конструкций:

– бронепанель с единичной керамической плиткой;

– бронепанель с металлической рамкой, ограничивающей свободные боковые поверхности плитки;

– бронепанель с полноразмерным керамическим слоем из нескольких соприкасающихся плиток.

При изготовлении образцов на основе керамики «Идеал» в качестве материала подложки применялся сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ).

Лицевой керамический слой образцов был скреплен методом термовакуумного прессования через пленку ПВХ с подложкой из СВМПЭ. Образцы также были «обмотаны» крест-накрест двумя слоями арамидной ткани Twaron СТ716 так, что два ее слоя были расположены с лицевой стороны, а четыре — с тыльной. Данные о структуре

и результаты испытаний образцов по классу Бр5 и Бр6 представлены соответственно в табл. 3 и 4.

Баллистические испытания проводили в испытательном центре АО «НПО Спецматериалов» в соответствии с ГОСТ 34286-2017. Стойкость образцов к воздействию средств поражения оценивали по отсутствию проникания пули или продуктов взаимодействия пули с защитным элементом за тыльную сторону защитной структуры. Кроме того, оценивали глубину проникания пули в подложку из СВМПЭ путём определения количества слоёв материала, пробитых пулей.

Испытания композитных бронеструктур по классу защиты Бр5

Проверка защитных свойств образцов проводилась при обстреле из снайперской винтовки СВД калибра 7,62 мм патронами инд. ГРАУ 7-БЗ-3 с пулей Б-32 со стальным термоупрочненным сердечником.

Результаты испытаний образцов, соответствующих классу защитной структуры Бр5

Тип структуры	Толщина керамической плитки, мм	Толщина подложки из СВМПЭ, мм	Поверхностная плотность структуры керамика + подложка, кг/м ²	Скорость пули, м/с	Количество пробитых слоёв подложки, %
С единичной керамической плиткой	7	11	34,12	725	26
	7	11	34,12	800	30
С металлической рамкой	7	7	30,24	800	40
	7	7	30,24	816	53
	7	7	30,24	810	61
С полноразмерным керамическим слоем	8	7	33,59	829	30
	8	7	33,59	821	26
	7	7	30,24	820	80

Результаты испытаний образцов, соответствующих классу защитной структуры Бр6

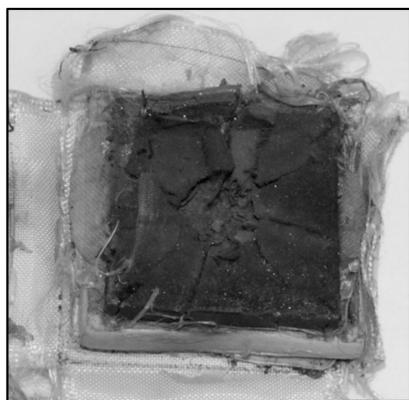
Тип структуры	Толщина керамической плитки, мм	Толщина подложки из СВМПЭ, мм	Поверхностная плотность структуры керамика + подложка, кг/м ²	Скорость пули, м/с	Количество пробитых слоев подложки, %
С металлической рамкой	12	24	63,48	752	29
С полноразмерным керамическим слоем	12	24	63,48	825 821	– 74
	12	24	63,48	832	67

На рис. 3 представлен образец с единичной керамической плиткой толщиной 7 мм и подложкой из СВМПЭ толщиной 11 мм, соответствующий классу защитной структуры Бр5. Поверхностная плотность структуры составила 34,12 кг/м². Скорость пули составила 800 м/с. Картина разрушения керамики характеризуется образованием конуса Герца, кольцевыми и радиальными магистральными трещинами. Количество пробитых слоев подложки из СВМПЭ составило 26 % от общего количества слоев. Поражение является кондиционным, место попадания пули расположено вблизи от центра плитки, где и расположена зона сплошного разрушения керамики. Отсутствие ограничения свободных боковых поверхностей плитки привело к образованию большого количества радиальных магистральных трещин. В результате испытания бронеструктура не была пробита, что говорит о высокой эффективности керамики.

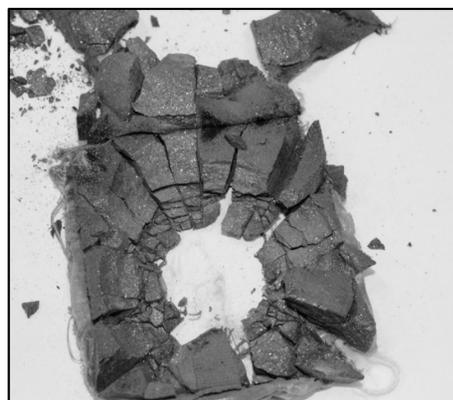
Образец бронеструктуры с металлической рамкой, соответствующий классу защитной структуры Бр5, представлен на рис. 4. Между керамической плиткой и стальной рамкой находится клеевое связующее — эпоксидная смола. Толщина подложки из СВМПЭ составила 7 мм. В остальном методика изготовления и материалы были те же, что и для образца с изолированной плиткой. Поверхностная плотность структуры составила 30,24 кг/м².

Проверка защитных свойств образца также проводилась обстрелом из винтовки СВД патронами 7-БЗ-3 калибра 7,62 мм с пулей Б-32, скорость которой составила 800 м/с. Структура также не была пробита, количество пробитых слоев подложки составило 40 % от общего числа.

На рис. 4, а изображена тыльная сторона разрушенной керамической плитки толщиной 7 мм, где видны радиальные и кольцевые трещины, а также образованный конус Герца. Место попадания пули расположено вблизи центра



а



б

Рис. 3. Образец композитной бронеструктуры с единичной керамической плиткой после испытаний: а — сторона обстрела; б — лицевой керамический слой

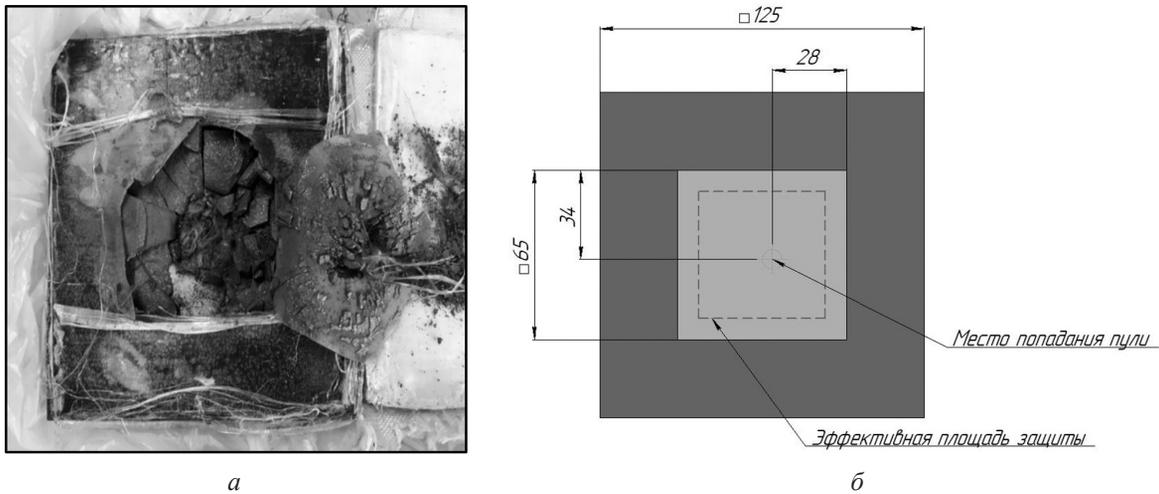


Рис. 4. Образец с металлической рамкой после испытаний: а — тыльная сторона керамической плитки; б — схема места попадания пули

плитки (рис. 4, б). Согласно ГОСТ 34286-2017, расстояние от края защитной структуры до центра попадания должно составлять не менее 5 калибров. Площадь части защитной структуры, удовлетворяющей этому требованию, понимается как эффективная площадь защиты. С учётом размеров применённой стальной рамки, эффективная площадь отмечена на рис. 5, б пунктиром. Использование рамки позволяет провести баллистические испытания в соответствии с ГОСТ 34286-2017, что невозможно для единичной плитки.

Наименьшее расстояние от места попадания пули до края керамической плитки было получено для третьего образца и составило 12 мм, то есть около полутора калибров, что обеспечило предельно жесткие условия работы керамики по сравнению с попаданием в центр образца. Соответственно, для третьего образца доля пробитых слоёв подложки составила 61 %, в то время как для зачётных выстрелов получили 40 % и 53 %, в среднем 46 %.

На рис. 5 представлен образец с полноразмерным керамическим слоем, соответствующий классу защитной структуры Бр5. Поверхностная плотность структуры равна 30,24 кг/м². Толщина керамического слоя составила 8 мм, а подложки из СВМПЭ — 7 мм.

При испытании на противоположную стойкость было произведено 3 выстрела. Первый выстрел был произведен патроном 7Н13 калибра 7,62 мм с пулей ПП, скорость которой составила 829 м/с. Количество пробитых слоёв подложки

из СВМПЭ первым выстрелом составило 30 % от общего количества слоёв. Вторым и третьим выстрелами были произведены патронами 7-БЗ-3 с пулями Б-32 со скоростью 818 м/с и 806 м/с. Вторым выстрелом было пробито наибольшее количество слоёв подложки — 67 %, а третьим — 38 % слоёв от общего количества.

На рис. 5, в отмечены места попадания пули. Первый и второй выстрел являются кондиционными, а место попадания третьего выстрела расположено вблизи края керамической плитки, что объясняет большой объём разрушения плитки. Картина разрушения также характеризуется образованием кольцевых и радиальных трещин. После трех выстрелов структура не была пробита, что говорит о высокой эффективности керамики «Идеал». Среднее количество пробитых слоёв подложки для первого кондиционного выстрела в образец с лицевым слоем толщиной 8 мм составило 28 %. Выстрел по образцу с лицевым слоем толщиной 7 мм привёл к пробитию 80 % подложки.

Испытания композитных бронеструктур по классу защиты Бр6

Были изготовлены и испытаны образцы бронеструктур с металлической рамкой (рис. 6, а) и полноразмерным керамическим слоем (рис. 6, б), соответствующие классу защитной структуры Бр6.

Поверхностная плотность структур с металлической рамкой и с полноразмерным керами-

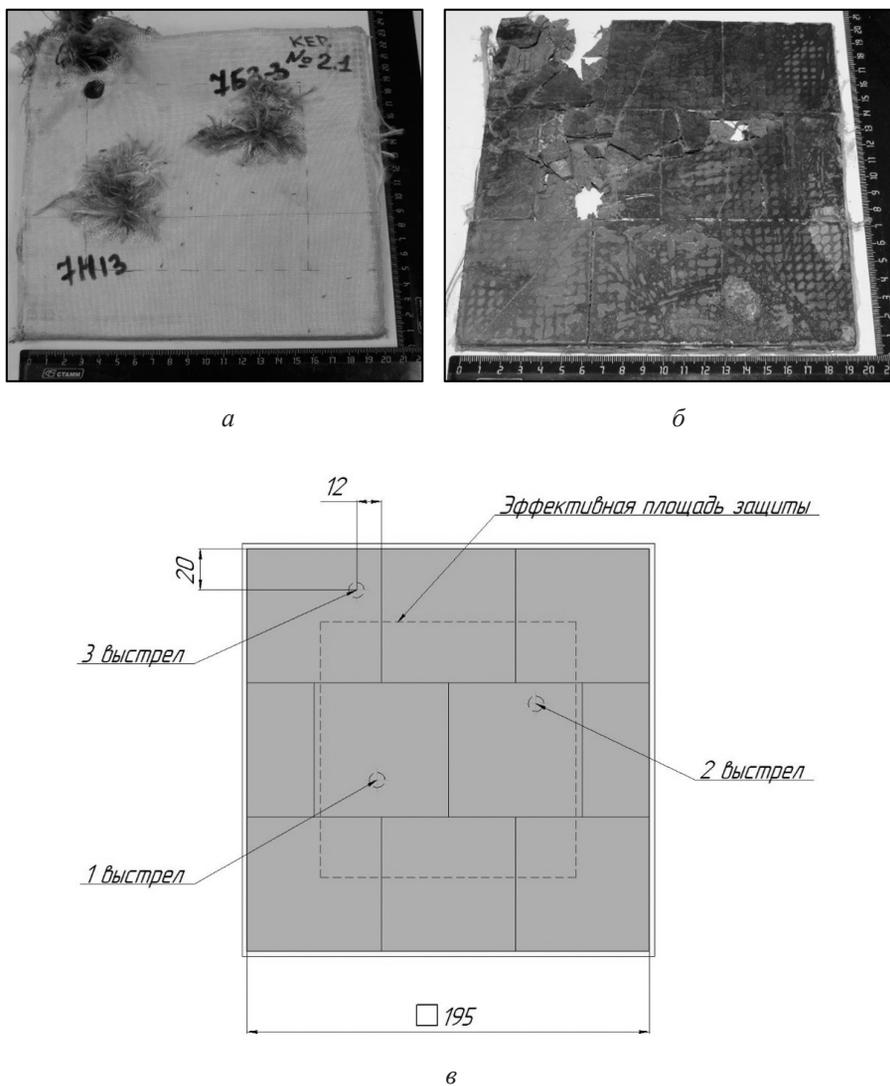


Рис. 5. Образец с полноразмерным керамическим слоем: а — сторона обстрела; б — лицевой керамический слой; в — схема мест попадания пуль

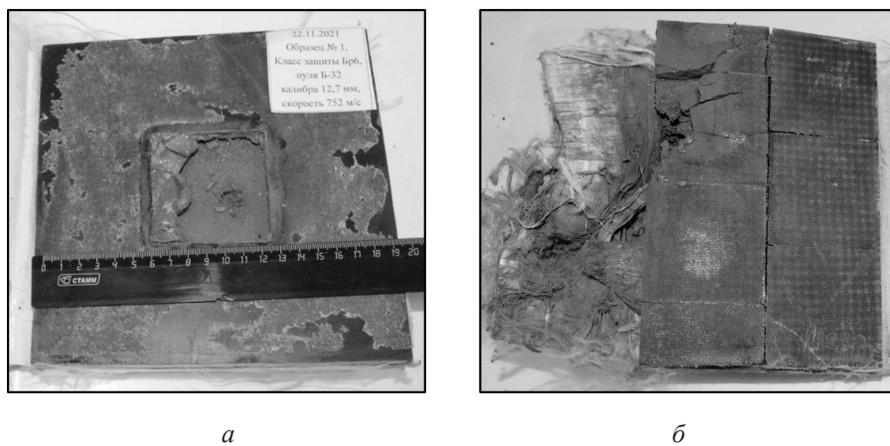


Рис. 6. Лицевая сторона образцов, прошедших испытания по классу защитной структуры Брб: а — с металлической рамкой; б — с полноразмерным керамическим слоем

ческим слоем составила $63,48 \text{ кг/м}^2$. Толщина керамических плиток равна 12 мм, а подложки из СВМПЭ — 24 мм. Расположение плиток было такое же, как показано на рис. 5.

Проверка защитных свойств образцов проводилась при обстреле патронами 57-БЗ-542 калибра 12,7 мм с пулей Б-32. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Скорость пули при испытании образца с металлической рамкой составила 752 м/с. Как видно из рис. 6, а, керамическая плитка практически полностью разрушилась, а количество пробитых слоев подложки составило 29 % от общего числа слоев.

При испытании на противопульную стойкость первого образца с полноразмерным керамическим слоем было произведено 2 выстрела. Скорость пули при первом выстреле составила 825 м/с. Место попадания пули — вблизи края панели, примерно в 2 калибрах от края панели. Образец не был пробит, керамическая плитка полностью разрушена, а расслоение и деформация подложки не позволили оценить количество пробитых слоёв подложки. Скорость пули при втором выстреле — 821 м/с (рис. 6, б). В итоге двух выстрелов левая сторона керамической панели была разрушена, а на оставшихся плитках наблюдаются кольцевые и радиальные магистральные трещины. Общее количество пробитых слоев подложки в области второго выстрела составляет 74 %.

Такая же картина разрушения керамики наблюдалась и для второго образца. Сердечник

пули при взаимодействии с керамическим слоем во всех случаях частично срабатывается и разрушается (рис. 7). Подложки из СВМПЭ при испытаниях не были пробиты, однако в местах попаданий наблюдались большие выпучины и расслоение подложек (рис. 8).

Обсуждение результатов

Для количественного сравнения результатов испытаний рассмотренных образцов бронеструктур требуется существенно большая статистика, чем полученная в результате проведённых испытаний. Однако полученные результаты позволяют сделать ряд качественных выводов.

Прежде всего следует отметить, что защитные структуры на основе керамики «Идеал» и СВМПЭ выдержали испытания на соответствие классам защиты Бр5 и Бр6. Поверхностные плотности структур керамика + подложка составляют соответственно $30,2$ и $63,5 \text{ кг/м}^2$, что лучше значений, полученных для любых других типов керамики. Качество керамики подтверждает и тот факт, что защитные панели выдерживали выстрелы в край, на расстоянии около двух калибров, как для калибра 7,62 мм, так и для 12,7 мм.

Использованная в работе подложка из СВМПЭ была получена прессованием листов UD материала Dунеема®. Поскольку подложка имеет слоистую структуру, баллистическую стойкость защитной панели можно количественно оценить по доле пробитых слоёв подложки.



Рис. 7. Разрушенный сердечник пули Б-32 после обстрела образца с керамическим слоем толщиной 12 мм

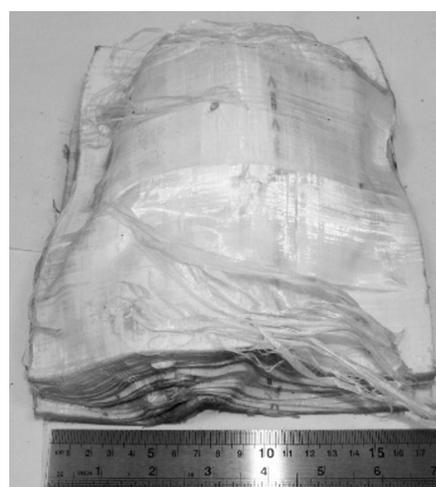


Рис. 8. Тильная сторона подложки из СВМПЭ после двух выстрелов пулями Б-32 калибра 12,7 мм

При этом для исключения краевых эффектов необходимо учитывать место попадания пули: вблизи края панели условия деформации подложки существенно меняются.

Использование образцов керамической плитки в стальной рамке при испытаниях калибром 7,62, с оговоркой о малой статистике, даёт результаты лучшие, чем при испытаниях полноразмерных панелей того же состава. Этот результат подтверждает экспериментальные данные о повышении баллистической стойкости при введении ограничений керамики по периметру [17]. Использование рамки даёт ощутимое методическое преимущество, уменьшая требуемое для испытаний количество керамических плиток.

Выводы

Разработана методика оценки защитных свойств композитной структуры, основанная на применении металлической рамки. Данный метод позволяет уменьшить расход керамического материала, что является перспективным способом испытаний образцов. Близкие значения акустического импеданса керамики «Идеал» и стали позволяют обеспечить необходимые условия оценки защитных свойств образцов бронеструктур. При этом количество керамических плиток, требуемых для изготовления опытных образцов (в сравнении с полноразмерным керамическим слоем), минимально.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности композитных структур на основе керамики «Идеал», обладающих уникально низкой поверхностной плотностью — 30,2 кг/м² для Бр5 и 63,5 кг/м² для Бр6.

Литература

1. Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Маринин В.М. и др. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования. — Москва: РадиоСофт, 2008. 406 с.
2. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Материалы и структуры легкой бронезащиты: учебник. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 191 с.
3. Crouch J.G. Introduction to armor materials. The Science of Armor Materials. Part I. Elsevier, 2017. 33 p.

4. Анастасиади Г.П., Сильников М.В. Работоспособность броневого материала. — СПб.: Астерион, 2004. 624 с.

5. Данилин Г.А., Огородников В.П., Заволокин А.Б. Основы проектирования патронов к стрелковому оружию: учебник – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2017. 368 с.

6. 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.

7. Шевченко В.Я., Сильников М.В., Долгин А.С. и др. Исследование защитных свойств нового керамического материала «Идеал» // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 4 (119). С. 87–96.

8. Сильников М.В., Шевченко В.Я., Михайлин А.И. и др. 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.

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. Nesmelov D.D., Perevislov S.N. Reaction sintered materials based on boron carbide and silicon carbide // Glass and Ceramics. 2015. V. 71. P. 313–319.

11. Hemley R.J., Ho-Kwang Mao, Chih-shiue Yan. Ultrahard diamonds and method of making thereof. Pat. US 7115241 B2. Publ. 03.10.2006.

12. Гаршин А.П., Кулик В.И., Нилов А.С. Ударопрочные материалы на основе технической керамики: Достижения и перспективы повышения их баллистической эффективности // Новые огнеупоры. 2016. № 4. С. 53–67.

13. Зайцев Г.П. Корундовая бронекерамика: опыт производства и применения // Экспертный союз. 2012. № 3 (24) [электронный ресурс].

14. Naik N.K., Rahul Goel, Kulkarni M.D. Stress wave micro-macro attenuation in ceramic plates made of tiles during ballistic impact // Journal of Applied Physics. 2008. № 103 (10). Pp. 30–37.

15. Jiusti J., Kammer E.H., Neckel L. et al. Ballistic performance of Al₂O₃ mosaic armors with gap-filling materials // *Ceramics International*. 2017. P. 2697–2704.

16. 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.

17. Rui Zhang, Bin Han & Tian Jian Lu (2020): Confinement effects on compressive and ballistic performance of ceramics: a review // *International Materials Reviews*. Pp. 1–26.

References

1. Grigoryan V.A., Kobylkin I.F., Marinin V.M. et al. *Materials and protective structures for local and individual reservations*. — Moscow: RadioSoft, 2008. 406 p.

2. Kobylkin I.F., Selivanov V.V. *Materials and structures of light body armor: textbook*. — Moscow: Moscow State Technical University Publishing House, 2014. 191 p.

3. Crouch J.G. *Introduction to armor materials. The Science of Armor Materials*. Elsevier. Part I. 2017. 33 p.

4. Anastasiadi G.P., Silnikov M.V. *The performance of armor materials*. — St. Petersburg: Asterion, 2004. 624 p.

5. Danilin G.A., Ogorodnikov V.P., Zavolokin A.B. *Small arms cartridge design basics: textbook* — St. Petersburg: Baltic State Technical University, 2017. 368 p.

6. Silnikov M.V., Himichev V.A. *Means of individual armor protection*. St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Academy of Law, Economics and Life Safety. — St. Petersburg: Fund «University», 2000. 480 p.

7. Shevchenko V.Ya., Silnikov M.V., Dolgin A.S. et al. Study of the protective properties of the new ceramic material «Ideal» // *Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*. 2021. № 4 (119). P. 87–96.

8. Silnikov M.V., Shevchenko V.Ya., Mikhaylin A.I. et al. Composite organo-ceramic panels for protection against 7,62 mm and 5,45 mm bullets with heat-strengthened diamond-silicon carbide core with adjustable interconnected structure // *Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*. 2021. № 3 (118). P. 107–113.

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. Nesmelov D.D., Perevislov S.N. Reaction sintered materials based on boron carbide and silicon carbide // *Glass and Ceramics*. 2015. V. 71 P. 313–319.

11. Hemley R.J., Ho-Kwang Mao, Chih-shiue Yan. Ultrahard diamonds and method of making thereof. Pat. US 7115241 B2. Publ. 03.10.2006.

12. Garshin A.P., Kulik V.I., Nilov A.S. *Impact-Resistant Materials Based on Technical Ceramics: Achievements and Prospects for Increasing Their Ballistic Efficiency* // *New refractories*. 2016. № 4. P. 53–67.

13. Zaitsev G.P. *Corundum armored ceramics: production and application experience* // *Expert Union*. 2012. № 3 (24) [electronic resource].

14. Naik N.K., Rahul Goel, Kulkarni M.D. stress wave micro-macro attenuation in ceramic plates made of tiles during ballistic impact // *Journal of Applied Physics*. 2008. № 103 (10). Pp. 30–38.

15. Jiusti J., Kammer E.H., Neckel L. et al. Ballistic performance of Al₂O₃ mosaic armors with gap-filling materials // *Ceramics International*. 2017. P. 2697–2704.

16. 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.

17. Rui Zhang, Bin Han & Tian Jian Lu (2020): Confinement effects on compressive and ballistic performance of ceramics: a review // *International Materials Reviews*. Pp. 1–26.