

# Конструктивные особенности броневых панелей на основе керамики

Н. К. Толочко, Ю. И. Бохан, С. Е. Мозжаров

---

Изготовлен ряд конструктивных вариантов броневых композиционных панелей на основе керамики, различающихся конфигурацией керамических компонентов, а также характером их послойной укладки. Проведены натурные испытания панелей и выполнен анализ их пулевой стойкости в зависимости от конструктивных особенностей. Рассмотрены закономерности взаимодействия панелей с пулями.

**Ключевые слова:** броневая панель, керамика, пулевая стойкость.

---

A number of constructive variants of armoured composite panels on the base of ceramics were manufactured. The panels were different in ceramic components configuration as well as layer-wise packing manner. Full-sized tests of the panels were carried out and their bullet-proofness depending on constructive features was analyzed. The regularities of panel-bullet interaction were considered.

**Keywords:** armoured composite panel, ceramic, bullet-proofness.

---

## Введение

Основными составными частями бронеодежды, предотвращающей повреждение человека от прямого воздействия огнестрельного стрелкового оружия, являются эластичные бронепрокладки и жесткие бронепанели. Бронепрокладки обеспечивают защиту от pistolных пуль как свинцовых, так и с простым стальным сердечником (калибры 7,62 и 9 мм). Их изготавливают из высокопрочных синтетических тканей — обычно арамидных (торговые марки “Кевлар”, “Тварон” и др.). Бронепанели по сравнению с бронепрокладками способны противостоять более сильной огневой мощи. В частности, они должны обеспечивать защиту от пуль автомата типа АК (калибры 5,45 и 7,62 мм) как с простым, так и с термоупрочнённым стальным сердечником.

Традиционно бронепанели изготавливают из броневой стали, однако ее применение приводит к значительному увеличению веса бронеодежды. Поэтому важнейшей задачей при создании современной бронеодежды с повышенными защитными свойствами является снижение веса бронепанелей. Решение этой задачи осуществляют по двум основным направлениям.

Первое направление связано с повышением пулевой стойкости стали, а также ее заменой более легкими металлами. Однако возможности снижения веса бронепанелей за счет повышения пулевой стойкости стали довольно ограничены (приблизительно на 10%) [1]. В свою очередь, применение легких металлов, в частности, титановых и алюминиевых сплавов, хотя и приводит к более заметному снижению веса панелей (приблизительно на 20%) [2, 3], но не обеспечивает требуемой пулевой стойкости, которая оказывается ниже, чем у стали. Как следствие, в последние годы все больше внимания уделяют второму направлению, связанному с применением вместо металлов технической керамики ( $Al_2O_3$ ,  $B_4C$ , SiC, AlN,  $Si_3N_4$ ), плотность которой в 2–3 раза меньше стали [4]. Однако создаваемые на сегодняшний день бронепанели на основе керамики далеки от своего совершенства, что объясняется, прежде всего, недостаточной изученностью характера их взаимодействия с пулей, отличительные особенности которого обусловлены высокой хрупкостью керамики.

Как правило, при разработке разных видов бронепанелей на основе керамики для каждого из них имеются те или иные отличия не только в

конструктивных признаках, но и в условиях испытаний, что делает затруднительным сопоставление их достоинств и преимуществ и, как следствие, определение основных подходов к оптимизации их конструкции.

Настоящая статья посвящена экспериментальному изучению пулевой стойкости различных конструктивных вариантов бронепанелей на основе керамики, которые подвергали одинаковым по своим условиям натурным испытаниям, что позволяло выявить зависимость их пулевой стойкости от присущих им конструктивных особенностей с учетом принятых условий испытаний.

### **Общая характеристика бронепанелей на основе керамики**

Обычно бронепанели на основе керамики состоят из двух взаимосвязанных частей: фронтальной и тыльной [5, 6]. Фронтальная часть включает один или несколько слоев керамических компонентов, принимающих удар пули и сдерживающих ее продвижение вглубь панели, в то время как тыльная часть, выполненная в виде многослойного пакета из синтетических тканей, смягчает действие удара пули на тело человека. Положение керамических компонентов фиксируется посредством матрицы, которая чаще всего выполнена из полимерного материала (эпоксидной смолы), играющего роль связующего, обеспечивающего соединение фронтальной и тыльной частей и, кроме того, пропитывающего тканевые слои тыльной части. Особенности конструкции бронепанелей на основе керамики в значительной мере определяются конфигурацией керамических компонентов, а также характером укладки компонентов в слои.

Керамическая преграда и пуля при столкновении подвергаются разрушению, так что после столкновения возникает поток осколков пули и керамики, движущихся в направлении первоначального действия пули. При этом кинетическая энергия потока осколков оказывается значительно меньше исходной кинетической энергии пули. Дробление пули и керамики на осколки приводит к рассредоточению ударной нагрузки на довольно большую площадь контакта и, кроме того, к частичному поглощению энергии пули за счет разрушения керамики и вовлечения разрушенного материала в движение. Тыльная тканевая часть преграждает дальнейшее движение осколков пули и керамики. При этом она деформируется, ослабляя их поражающее действие.

Традиционно керамические компоненты бронепанелей выполняют в виде пластин, уложенных в один

слой, с типичными размерами  $100 \times 100$  или  $50 \times 50$  мм [7]. В месте удара пули в пластине возникают трещины, которые распространяются практически по всей пластине, что приводит к ее дроблению на множество фрагментов. Как правило, под действием удара пули разрушается целиком вся пластина, что, при сравнительно больших размерах пластин, приводит к формированию значительной зоны разрушения бронепанели [8, 9]. При вторичном попадании пули в такую раздробленную пластину она может практически беспрепятственно пройти сквозь пластину.

Существуют два основных подхода к разработке бронепанелей на основе керамики, обладающих повышенной пулевой стойкостью. Согласно первому подходу совершенствование бронепанелей сводится к улучшению структуры, а также к частичному изменению конструкции их керамических элементов, в качестве которых традиционно используют пластины [4, 10, 11]. Например, пластины для снижения степени их разрушения в результате удара пули формируют в виде множества взаимосвязанных сегментов, разделенных канавками, которые играют роль стопоров, препятствующих распространению трещин от одного сегмента к другому [12]. Согласно второму подходу совершенствование бронепанелей связано с изменением их конструкции в целом, в частности, созданием многослойных панелей, содержащих несколько слоев из керамических компонентов, благодаря чему увеличивается количество барьеров для продвижения пули, а также панелей, состоящих из сравнительно небольших по размерам керамических компонентов, что приводит к локализации зоны разрушения в пределах ограниченного числа таких компонентов, включая компоненты, непосредственно принимающие на себя удар пули, и компоненты ближайшего окружения [5, 6, 13 – 17]. Реализация второго подхода обеспечивает, что особенно важно, повышение стойкости бронепанелей к многократному пулевому воздействию.

Рассмотрим в качестве примера характер разрушения бронепанели, состоящей из сравнительно большого числа керамических квадратных пластин со стороной  $D$ , уложенных в один слой [9]. Предположим, что пули, случайно попадая в панель, формируют зону ее поражения на участке в форме круга радиусом  $R$  и площадью  $S = \pi R^2$ . Предположим также, что каждая пуля вызывает разрушение только одной из исходных пластин — той, с которой она сталкивается.

Вероятность того, что первая пуля будет задержана панелью при столкновении с некоторой пластиной,  $P_1 = 1$ . Поскольку пластина в результате

столкновения разрушается, вторая пуля будет задержана панелью при условии, что она попадет в одну из оставшихся исходных пластин. Соответственно, вероятность того, что вторая пуля будет задержана панелью,  $P_2 = (S - D^2)/S$ . Аналогично, вероятность того, что третья пуля будет задержана панелью,  $P_3 = (S - 2D^2)/S$ . Вероятность того, что первые  $n$  пуль, попавших в панель, будут ею задержаны, определяется произведением индивидуальных вероятностей:

$$P(n) = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \dots P_n = \left(1 - \frac{D^2}{S}\right) \times \left(1 - \frac{2D^2}{S}\right) \left(1 - \frac{3D^2}{S}\right) \dots \left[1 - \frac{(n-1)D^2}{S}\right].$$

Таким образом, чтобы увеличить стойкость панели к многократному пулевому воздействию, то есть  $P(n)$ , необходимо увеличить число составляющих ее пластин  $n$ . При неизменной площади панели это означает, что необходимо стремиться к уменьшению размера пластин  $D$ .

Как отмечалось выше, уменьшение размеров керамических компонентов приводит к эффекту локализации зоны разрушения бронепанелей. Этот эффект обеспечивается при использовании не только сравнительно небольших по размерам керамических пластин, но также керамических цилиндров, призм, шаров [13 – 17].

Следует, однако, иметь в виду, что с уменьшением размеров керамических компонентов возрастает относительная площадь зазоров между ними в пределах одиночного слоя их укладки, что создает благоприятные условия для прохождения пули сквозь бронепанель в случае ее попадания в зазор. Вероятность сквозного прохождения пули при использовании квадратных пластин определяется формулой [9]

$$P_g = \frac{\left(D + \frac{d}{2}\right)^2 - D^2}{\left(D + \frac{d}{2}\right)^2} = 1 - \left[1 + \frac{d}{D} + \left(\frac{d}{2D}\right)^2\right],$$

где  $d$  — ширина зазора между компонентами.

Значение  $P_g$  увеличивается при попадании пули не только в зазор, но и в краевую область компонентов с некоторой шириной  $d_{\Delta}$ . При этом если в первом случае пуля создает клиновидный эффект, частично раздвигая компоненты, то во втором случае она вызывает скалывание крайней части компонентов. С учетом этого в формуле для  $P_g$  следует

использовать эффективную ширину зазора  $d_{\text{эф}} = d + 2d_{\Delta}$ . Проблема зазоров может быть решена за счет создания многослойных бронепанелей, в которых керамические компоненты укладываются таким образом, что компоненты одного слоя перекрывают зазоры между компонентами смежного слоя.

### Методика изготовления и испытания бронепанелей на основе керамики

Для изготовления бронепанелей использовали керамические компоненты из оксида алюминия  $Al_2O_3$ , арамидную ткань типа “Тварон” и связующие, роль которых играли клеевые композиции на эпоксидной основе, а также на основе синтетического каучука с адгезионными добавками.

Керамические компоненты были трех типов (рис. 1): 1) пластины в форме прямоугольника размерами  $30 \times 68 \times 4$  мм или квадрата размерами  $30 \times 30 \times 5$  мм; 2) цилиндры высотой 13,3 мм и диаметром 12,3 мм; 3) шары диаметром 4 мм. Компоненты всех типов обладали приблизительно одинаковой плотностью  $3,75 \text{ г/см}^3$  и твердостью 84 HRA.

Общий порядок изготовления бронепанелей был следующим. Сначала делали тыльную часть панели, которая представляла собой тканевый пакет, имевший вид прямоугольной подкладки, снабженной вертикальными боковыми стенками, для чего арамидную ткань, пропитанную клеем, послойно укладывали в матрицу и подвергали прессованию пуансоном. Обычно пакет состоял из 5 – 7 тканевых слоев. Клей после высыхания обеспечивал жесткое соединение тканевых слоев между собой. Затем формировали фронтальную часть панели, содержащую керамические компоненты, для чего на тканевом пакете послойно укладывали керамические компоненты, формируя из них два слоя, один из которых, передний,

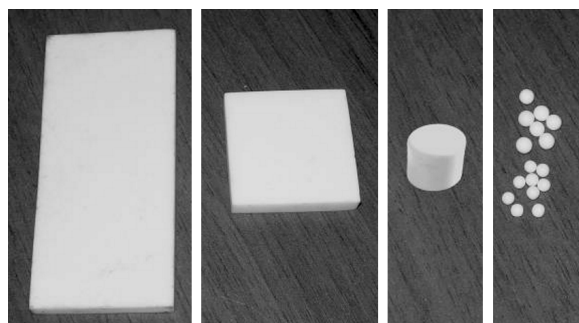


Рис. 1. Керамические компоненты различной конфигурации, использовавшиеся для изготовления броневых панелей.

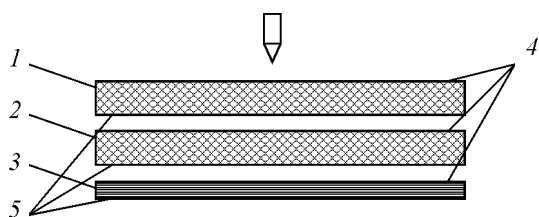


Рис. 2. Конструктивные элементы бронепанели с двумя слоями керамических компонентов: 1 – передний слой керамических компонентов, 2 – задний слой керамических компонентов, 3 – тканевый пакет, 4 – передние поверхности, 5 – задние поверхности.

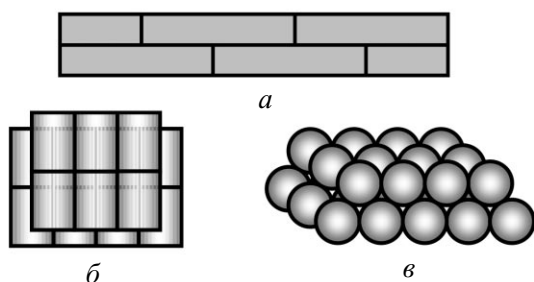


Рис. 3. Схемы двухслойной укладки керамических компонентов различной конфигурации с перекрытием зазоров между ними: а – пластины, б – цилиндры, в – шары.

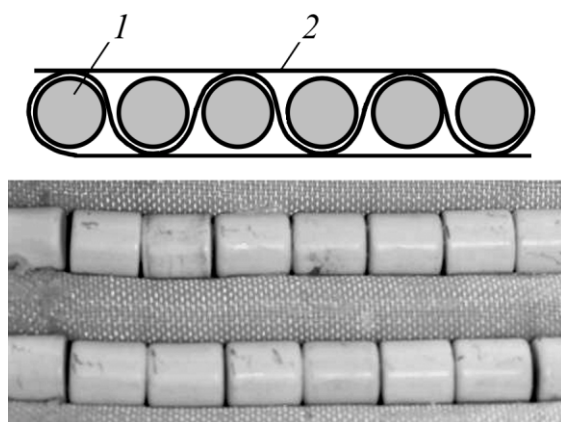


Рис. 4. Схема расположения прокладки из арамидной ткани в случае укладки керамических компонентов в форме цилиндров: 1 – керамические компоненты, 2 – ткань.

принимал на себя непосредственно удар пули, другой, задний, препятствовал дальнейшему продвижению образовавшегося потока осколков пули и керамики. Основные конструктивные элементы бронепанели с двумя слоями керамических компонентов показаны на рис. 2.

В ходе экспериментов было практически важно определить минимальное число слоев керамических

компонентов, достаточное для обеспечения пулевой стойкости, требуемой по условиям испытаний. В связи с этим первоначально испытываемые пластины содержали как два, так и три слоя керамических компонентов. Однако, как показали предварительные испытания, для обеспечения требуемой по условиям испытаний пулевой стойкости достаточно двух слоев керамических компонентов. К тому же уменьшение числа слоев керамических компонентов приводит к уменьшению толщины и, следовательно, веса панелей.

Укладку компонентов проводили таким образом, чтобы компоненты одного слоя перекрывали зазоры между компонентами смежного с ним слоя. Примеры двухслойной укладки компонентов различной конфигурации с перекрытием зазоров между компонентами показаны на рис. 3 (при укладке пластин наряду с исходными пластинами использовали их фрагменты, полученные разрезанием исходных пластин алмазным кругом).

В ряде случаев проводили комбинированную укладку слоев из компонентов в форме пластин и цилиндров, а также цилиндров и шаров.

При укладке цилиндров для разных образцов бронепанелей первоначально варьировали пространственную ориентацию цилиндров, располагая их продольные оси параллельно или перпендикулярно плоскости панели. Кроме того, в случае параллельного расположения продольных осей варьировали их взаимное направление в смежных слоях, ориентируя их параллельно или перпендикулярно друг другу. Однако, как показали предварительные испытания, для обеспечения требуемой по условиям испытаний пулевой стойкости наиболее предпочтительной является укладка цилиндров, при которой их продольные оси параллельны плоскости панели и, кроме того, параллельны друг другу в смежных слоях. При этом достигается не только повышение пулевой стойкости за счет уменьшения зазоров между цилиндрами, но также уменьшение толщины и, следовательно, веса панелей за счет более компактного расположения цилиндров.

Между слоями компонентов, а также между компонентами, уложенными в ряды в пределах каждого слоя, прокладывали арамидную ткань, которая частично сдерживала смещение компонентов при ударе, а также смягчала их столкновение при смещении. Пример расположения прокладки из арамидной ткани в случае укладки компонентов в форме цилиндров показан на рис. 4. Кроме того, арамидную ткань использовали в качестве покрытия наружной поверхности компонентов фронтального слоя.

Полученную таким образом многослойную композицию пропитывали клеем и уплотняли путем прессования. Клей после высыхания формировал эластичную матрицу, посредством которой фиксировали положение компонентов, а также взаимное соединение компонентов, прокладочных и покровных тканевых слоев и тыльной части бронепанели.

Изготовленные бронепанели имели форму прямоугольника размерами  $100 \times 130$  мм или квадрата со стороной  $100 \times 100$  мм. Общая толщина панелей разных типов зависела от размеров керамических компонентов и числа их слоев. Для панелей всех типов толщина тыльной части, определяемая числом содержащихся в ней тканевых слоев, составляла от 3 – 5 мм.

Бронепанели подвергали испытаниям на пулевую стойкость, которые проводили при содействии НПРУП «Техномаг» Физико-технического института НАН Беларуси. В ходе испытаний по каждой панели производили одиночный выстрел из автомата Калашникова АКС-74 с расстояния 25 метров патроном 7Н6 калибра 5,45 мм с пулей типа ПС (с термоупрочненным стальным сердечником). Панели закрепляли тыльной частью на вертикально расположенной плите из ДСП. Пулю направляли в центральную область фронтальной части панели перпендикулярно ее плоскости.

#### Результаты испытания бронепанелей на основе керамики

Панели, по которым был проведен выстрел, разбирали для анализа характера разрушений. На рис. 5 показано типичное входное отверстие пули в броневую панель перед началом разборки.

В процессе разборки последовательно снимали слои, из которых состояла панель. Ниже приведены фотографии нескольких панелей из керамических



Рис. 5. Входное отверстие пули на наружной поверхности панели с тканевым покрытием.

компонентов различной конфигурации в процессе разборки.

На рис. 6 показан передний слой керамических компонентов с пулевым отверстием (покрытие из арамидной ткани удалено). Панель на рис. 6а состояла из трех слоев прямоугольных пластин, на рис. 6б — из трех слоев квадратных пластин, на рис. 6в — из двух слоев цилиндров.

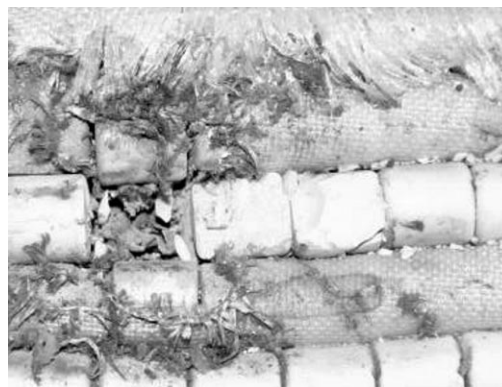
В панелях, состоящих из керамических пластин, пуля проходила сквозь слои керамических пластин



а

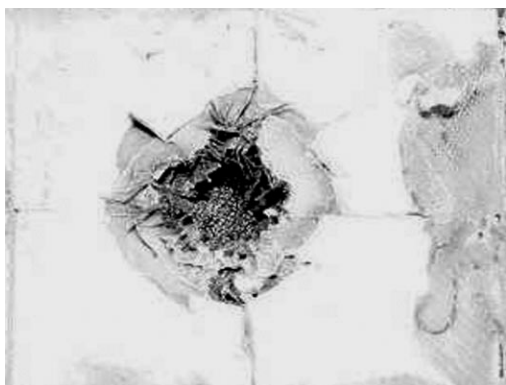


б

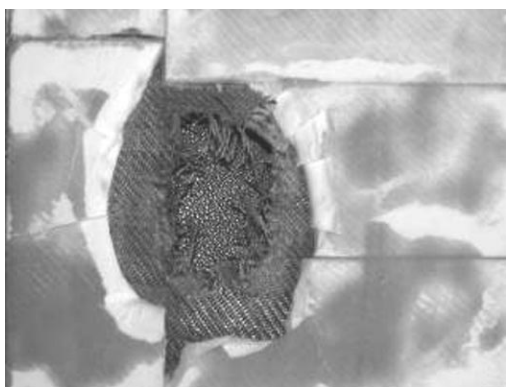


в

Рис. 6. Первый — фронтальный слой панели из керамических компонентов в форме прямоугольных (а) и квадратных (б) пластин и цилиндров (в).



а



б

Рис. 7. Выходные отверстия от пули в тыльном слое керамических компонентов в форме прямоугольных (а) и квадратных (б) пластин.



Рис. 8. Тыльная поверхность частично разрушенного тканевого пакета панели, состоящей из керамических компонентов в форме пластин.

(рис. 7) и, потеряв энергию, застревала в тканевом пакете, который при этом частично повреждался (рис. 8). Типичная картина разрушения керамической пластины под действием пули показана на рис. 9.

В панелях, состоящих из керамических цилиндров, пуля, как правило, застревала в слоях керамических цилиндров.



Рис. 9. Разрушение керамической пластины под действием пули.

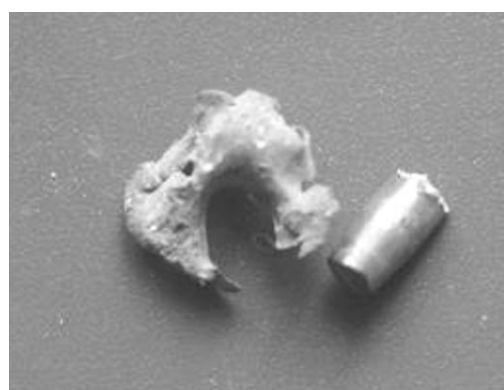


Рис. 10. Фрагменты оболочки и стального сердечника пули.

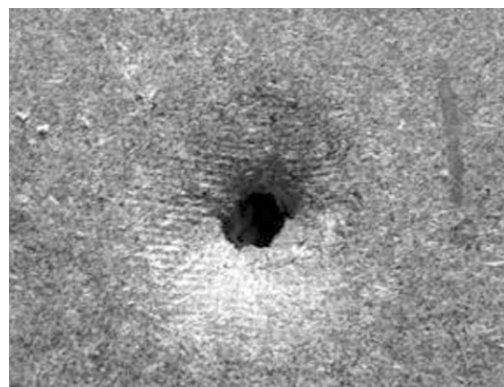
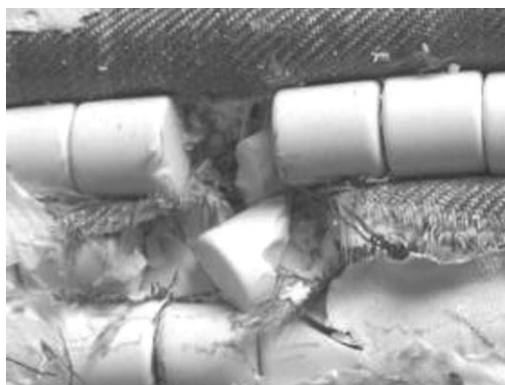


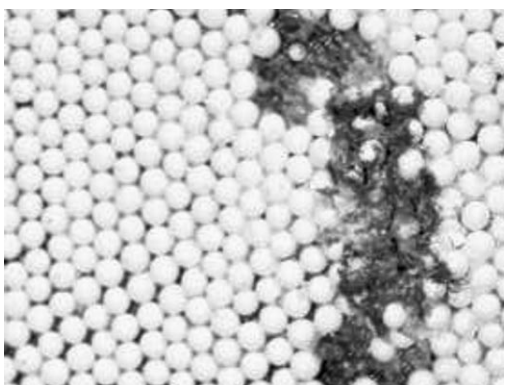
Рис. 11. Пулевое отверстие в плите из ДСП.

Взаимодействуя с керамическими компонентами, пуля, разрушая эти компоненты, сама подвергалась разрушению, распадаясь на фрагменты (рис. 10).

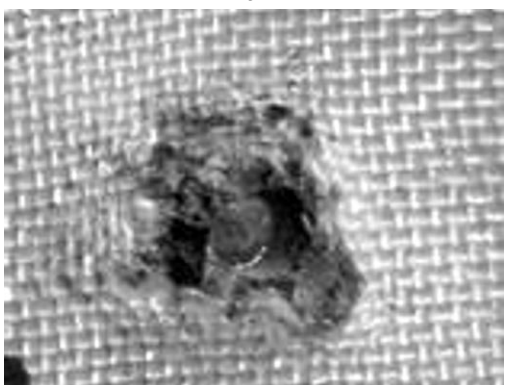
Панели, состоящие из керамических шаров, не выдержали испытаний. На рис. 11 показано отверстие от пули в плите из ДСП, на которой был закреплен



а



б



в

Рис. 12. Различные части комбинированной панели из керамических компонентов в форме цилиндров и шаров: а — фронтальный слой керамических цилиндров с входным пулевым отверстием; б — тыльный слой керамических шаров с выходным пулевым отверстием; в — фронтальная поверхность тканевого пакета с застрявшим сердечником пули.

один из образцов панели, состоящей из керамических шаров.

В то же время были получены положительные результаты испытаний панелей, содержащих слой керамических цилиндров и слой керамических шаров: пуля проходила сквозь слои цилиндров и шаров и застревала в тканевом пакете, который при этом частично повреждался (рис. 12).

## Заключение

Результаты экспериментов показывают, что керамика — один из наиболее перспективных материалов для изготовления бронеодежды. В частности, весьма эффективно применять многослойные бронепанели, состоящие из сравнительно небольших по размерам керамических компонентов в форме пластин или цилиндров, которые способны обеспечивать преграду для автоматных пуль с термоупрочненным стальным сердечником. Важным достоинством таких панелей является их повышенная стойкость к многократному пулевому воздействию.

Особого внимания с точки зрения экономики производства заслуживают бронепанели, состоящие из цилиндрических керамических компонентов, которые широко выпускаются в промышленности и в коммерческом отношении являются вполне доступными [17]. Их обычно применяют в качестве мелющих тел в мельницах при измельчении железной руды и руд цветных металлов, цементного клинкера, угля, строительных материалов, на фабриках по производству эмали благодаря высокой плотности, высокой прочности и высокому сопротивлению износу. Именно такого рода керамические компоненты использовали для изготовления бронепанелей в рассмотренных экспериментах.

## Литература

1. Патент РФ 2185459, Кл. С22С38/44/ Камаев Е.А., Сахаров С.А. Высокопрочная броневая листовая сталь. Публ. 20.07.2002.
2. Петрова Э.Н., Яньков В.П. Титановые сплавы как броневые материалы для СИБ. [Электронный ресурс], 2009. Режим доступа: <http://www.niistali.ru/article.php/> Дата доступа: 13.04.2010.
3. Каширин В.Ф., Петрова Э.Н., Яньков В.П. Перспективы повышения броневых свойств алюминиевых сплавов. [Электронный ресурс], 2009. Режим доступа: <http://www.niistali.ru/article.php/> Дата доступа: 13.04.2010.
4. Шевченко В.Я., Баринов С.М. Техническая керамика. М.: Наука, 1993, 187 с.
5. Pat. 5114772, US, Int. Cl. F41H 005/04; B32B 003/10; B32B 003/14. Vives M., Taveau P., Etienne J., Remillieux Y. Protective material having a multilayer ceramic structure, pub. 19.05.1992.
6. Pat. 7067031, US, Int. Cl. B32B 37/00; B05D 7/00; F41H 5/013. de Witt F. Process for making a ceramic armor plate, pub. 27.06.2006.
7. Гаршин А.П. и др. Керамика для машиностроения. М.: Научтехлитиздат, 2003, 384 с.
8. Толочко Н.К. и др. Броневые материалы на основе керамики. Веснік Віцебск. дзярж. ун-та, 2007, № 4, с. 137 – 143.

9. Tolochko N.K., Bokhan Yu.I. Armoured panels on the base of ceramics. Ceramics. Polish Ceramic Bulletin, 2008, v. 101, p. 91 – 98.
10. Pat. 5032550, US, Int. Cl. C04B35/575; C04B35/565; C04B35/58. Derkacy J.A. High impact resistant ceramic composite, pub. 16.07.1991.
11. Bao Y. et al. Prestressed ceramics and improvement of impact resistance. Materials Letters, 2002, v. 57, Is. 2, p. 518 – 524.
12. Appl. WO/2005/114089, Germany, Int. Cl. F41H 005/04, Heidenreich B., Nedele M., Schulte R. Ceramic armour plate, armouring system, and method for producing armour plate, pub. 01.12.2005.
13. Pat. 6203908, US, Int. Cl. F41H 502; D02G 300. Cohen M. Composite armor, pub. 20.03.2001.
14. Appl. WO/2006/103431, GB, Int. Cl. F41H 5/04, Baxter A.G., Jones R.A.B., Stuart T.P. A ceramic armour element for use in armour. pub. 05.10.2006.
15. Pat. 6860186, US, Int. Cl. F41H005/02. Cohen M. Ceramic bodies and ballistic armor incorporating the same, pub. 1.03.2005.
16. Pat. 3705558, US, Int. Cl. F41H 5/04. McDougal G.A., Schwartzwadler K. Armor, pub. 24.04.1963.
17. Pat. 6112635, US, Int. Cl. F41H5/04; F41H5/00; F41H5/04, Cohen M. Composite armor panel, pub. 9.05.2000.

***Толочко Николай Константинович** — Белорусский государственный аграрный технический университет (г. Минск), доктор физико-математических наук, профессор. Е Специалист в области физики твердого тела, технологии материалов. E-mail: n.tolochko@hotmail.com.*

***Бохан Юрий Иванович** — Витебский государственный университет им. П.М. Машерова (г. Витебск), кандидат физико-математических наук, декан. Специалист в области физики твердого тела. E-mail: bokhan@vsu.by.*

***Мозжаров Сергей Евгеньевич** — Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси (г. Витебск), научный сотрудник. Специалист в области технологии материалов.*