



УДК 666.762.11+666.762.94]:623.093.001.5

ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА КОМБИНИРОВАННЫХ БРОНЕПАНЕЛЕЙ

Приводятся результаты баллистических испытаний и исследований керамических мозаичных элементов внешнего слоя бронепанелей производства французской фирмы «ARES Protection SAS» по IV уровню защиты.

Ключевые слова: керамика, мозаичные керамические элементы (МКЭ), нитрид кремния, оксид алюминия, средства индивидуальной защиты, бронепанель, баллистические испытания, живучесть, пулестойкость.

В последнее время к броне предъявляются высокие требования не только по пулестойкости, но и по живучести, которая характеризует способность бронеконструкции сохранять свои защитные свойства при воздействии нескольких средств поражения. Специально для этих целей в последние годы разработана броня в виде мозаичных керамических элементов (МКЭ), зафиксированных в эластичной матрице. В отличие от конструкции с использованием монопанелей и керамических плиток мозаичная броня [1] выдерживает до 5 поражений на 1 дм² и легко ремонтируется в полевых условиях. Дробление единичного элемента керамики обеспечивает локализацию области разрушения, а отсутствие жестких связей между элементами способствует рассеиванию энергии удара и обеспечивает ремонтпригодность конструкции.

Комбинированная броня с МКЭ применяется как для средств индивидуальной защиты, так и для бронирования спецтехники: бронемашин, боевых вертолетов и кораблей. Гибкость такой конструкции позволяет укрывать сложнопрофильные поверхности в труднодоступных местах, где в качестве подложки может быть использован металлический корпус техники. На выставке «Интерполитех-2008» фирма «Омнитек-Н» представляла защитные панели французской фирмы «ARES Protection SAS» по разным классам защиты (рис. 1, а), фронтальный керамический слой которых выполнен в виде мозаики (рис. 1, б).

Анализ информации по используемым средствам бронезащиты, проведенный за последние 20 лет как за рубежом, так и в России, позволил выявить более 50 патентов по мозаичной броне.



И. Ю. Келина

E-mail: kelina@technologiya.ru

Ведущими странами в этой области разработок являются США и Израиль. Предметами патентования выступают форма и геометрические размеры керамических элементов, химический состав порошков, структура опорного слоя, технология изготовления и способы соединения слоев и др. Наибольший интерес представляет геометрическая форма МКЭ, позволяющая отклонить пулю от траектории полета при взаимодействии. Для этих целей внешней поверх-



Рис. 1. Внешний вид (а) и структура (б) защитной панели Groupe TenCate Liba 7,62x54 RAPI B32 фирмы «ARES Protection SAS» по IV уровню защиты



ности МКЭ придается форма конуса, пирамиды или сферы и др. Керамическая мозаичная броня данного вида разработана и серийно выпускается фирмой «PlasanSasa», Израиль, под маркой SMART и фирмой ARES, Франция, под маркой LIBA. По данным производителей, бронепанели с мозаичным керамическим слоем площадью защиты 7,5 дм² выдерживают более 10 попаданий бронебойно-зажигательных пуль типа Б-32 калибра 7,62 мм и соответствуют самым высоким международным стандартам и требованиям, которые включают VPAM BRV 2009, NATO STANAG 4569 и AEP55, что соответствует классу 6а ГОСТ Р 51744 (рис. 2). В России активные исследования в этой области проводят ООО НПЦ «СПЛАВ», ОАО «НИИ стали», ОАО «ОНПП «Технология», изготовление и мелкосерийное производство МКЭ в виде роликов и шестигранников в диапазоне диаметров и толщин 30 мм из оксида алюминия освоены в ОАО «ОНПП «Технология» и ЗАО «НЭВЗ-КЕРАМИКС».

Ниже приводятся результаты исследований двух бронепанелей (образец № 1 и 2) производства зарубежных фирм (рис. 3, табл. 1). Проведенные баллистические испытания бронепанелей подтвердили заявленную пулестойкость по классу 6а ГОСТ Р 50744 и живучесть — 5 выстрелов в 1 дм² с расстоянием между попаданиями менее 50 мм (рис. 4, а). Характер повреждения панелей локализован и ограничен размером одного поврежденного керамическо-



Рис. 3. Внешний вид бронепанели (образец № 1)

Таблица 1. Основные показатели импортных бронепанелей

Показатели	№ 1	№ 2
Масса панели, кг	3,3	3,45
Габаритные размеры, мм	250×300	250×300
Толщина панели, мм	22 ± 1	28 ± 1
Поверхностная плотность защиты, кг/м ²	44	46

го элемента (диаметр 10–15 мм), рис. 4, б. Однако заброневая деформация (отпечаток на пластилиновом блоке диаметром и глубиной до 40 мм) не соответствует российскому стандарту по забронеовой контузионной травме. Дальнейшие испытания на пулестойкость показали высокую живучесть и сохранение целостности изделия,

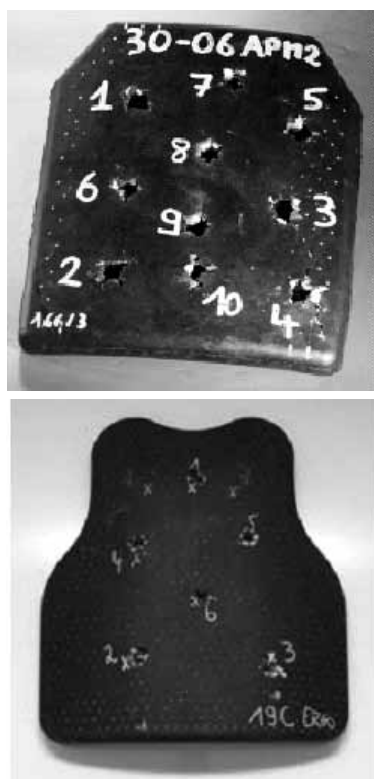


Рис. 2. Внешний вид бронепанелей после испытаний (>10 выстрелов)

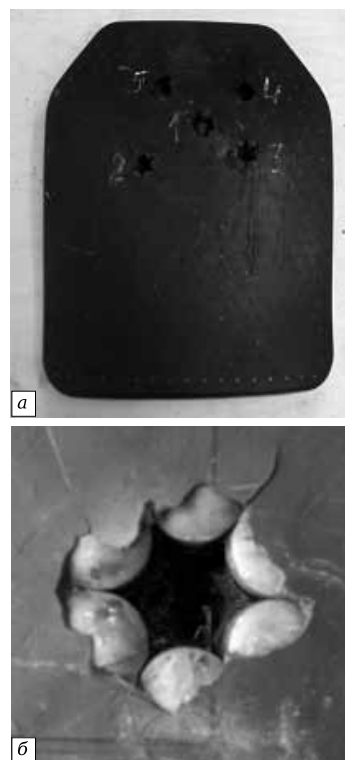


Рис. 4. Внешний вид бронепанелей после баллистических испытаний: а — лицевая сторона; б — локализация области разрушения



расслоение конструкции произошло только на 13-м выстреле (рис. 5).

Исследуемые бронепанели состоят из двух не склеенных между собой слоев: фронтального (дробяще-отклоняющего, по терминологии ООО «НПЦ «СПЛАВ») толщиной 12,0 и 13,5 мм и опорного (задерживающего) в виде прессованной панели из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) толщиной 10 и 13 мм соответственно. Фронтальный слой состоит из отдельных МКЭ, залитых эластичным связующим на основе полиуретанового эластомера (рис. 6). Плотная упаковка обеспечивается за счет геометрии МКЭ: в данном случае в форме цилиндра и замка (рис. 7, 8). Аналогичная форма замка приведена в патенте [2] и представляет собой цилиндр с шестью выступами, входящими в промежутки двух смежных цилиндрических элементов.

Исследования состава МКЭ показали, что они изготовлены из различных керамических материалов: на основе Al_2O_3 (образец № 1) и Si_3N_4 (образец № 2), причем элементы из корундовой керамики отличаются плотностью, что хорошо видно на рентгеновском снимке (рис. 9). По данным рентгенофазового анализа в элементах в форме замка (образец № 1), имеющих более высокую плотность, присутствует диоксид циркония (табл. 2). Однако результаты рентгеноспектраль-

ного микроанализа (РСМА) показали присутствие ZrO_2 (6–8 %) и в элементах в форме цилиндра. Следует отметить, что керамика в системе $Al_2O_3-ZrO_2$ все чаще применяется в качестве ударопрочного материала, так как обладает более высокими механическими характеристиками (прочностью, износостойкостью, стойкостью к ударным нагрузкам) по сравнению с чистым корундом [3].

Электронно-микроскопические исследования МКЭ в форме цилиндра в образце № 1 показали, что его микроструктура образована зернами призматической и изометричной формы размерами 5–10 мкм, вокруг которых группируются зерна размерами 1–4 мкм (рис. 10, а). Исследования при больших увеличениях выявили, что зерна состоят из агломератов, образованных



Рис. 5. Внешний вид бронепанели № 2 после баллистических испытаний: а — лицевая сторона; б — тыльная сторона



Рис. 6. Структура бронепанели № 1

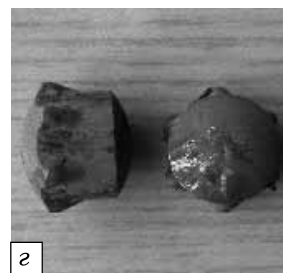
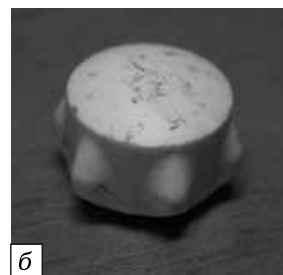
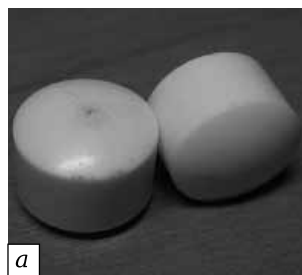


Рис. 7. Внешний вид МКЭ в форме цилиндра (а, в) и замка (б, г)

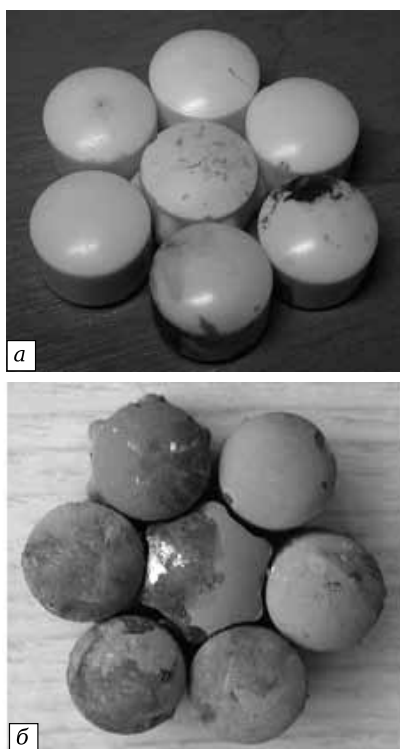


Рис. 8. Схема укладки МКЭ в панелях

частицами размером около 50 нм (рис. 10, б). Микроструктура МКЭ в форме замка отличается от микроструктуры элементов в форме цилиндра преобладанием зерен размерами 5–10 мкм (рис.

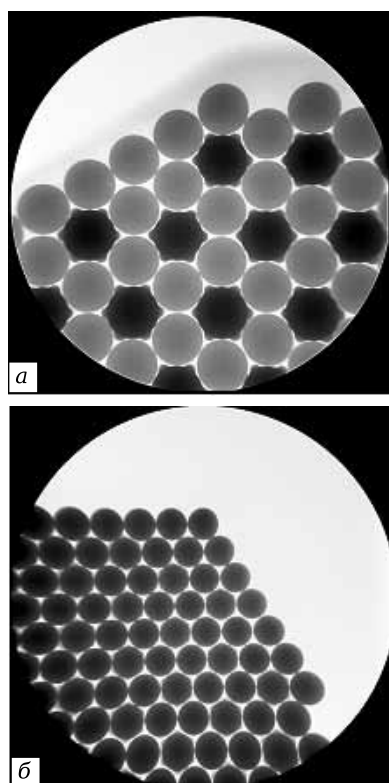


Рис. 9. Рентгеновский снимок керамического фронтального слоя панелей № 1 (а) и № 2 (б)

Таблица 2. Характеристика МКЭ

Показатели	№ 1		№ 2	
Толщина керамического элемента, мм	12		13,0–13,5	
Толщина подложки из СВМПЭ, мм	10		13	
Форма МКЭ	Цилиндр	Замок	Цилиндр	Замок
Фазовый состав керамики	Al_2O_3	Al_2O_3 – ZrO_2	$\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$	$\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$
Плотность керамики, г/см ³	3,88	4,02	3,23	3,25
Пористость, %	0,15–0,30	0,2–0,3	0,2–0,3	0,2–0,3
Микротвердость, ГПа	14,8	16,0	13–14	14,5–15,2
Способ соединения	Керамический слой и подложка не склеены между собой		Между керамикой и подложкой расположен слой арамидной ткани	

11, а), а также наличием включений, располагающихся внутри и по границам зерен основной фазы (рис. 11, б). Картирование МКЭ с помощью РСМА показало, что распределение элементов в форме цилиндра равномерное (рис. 12, а), а в элементах в форме замка наблюдается локализация фазы с повышенным содержанием циркония (рис. 12, б).

Электронно-микроскопические исследования МКЭ образца № 2 показали, что микроструктура элемента в форме замка плотная, представляет собой сочетание призматических зерен $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ размером примерно 10 мкм и зерен неопределенной морфологии размером менее 5 мкм (рис. 13, а). Рентгеноспектральный анализ выявил, что основными элементами в замке

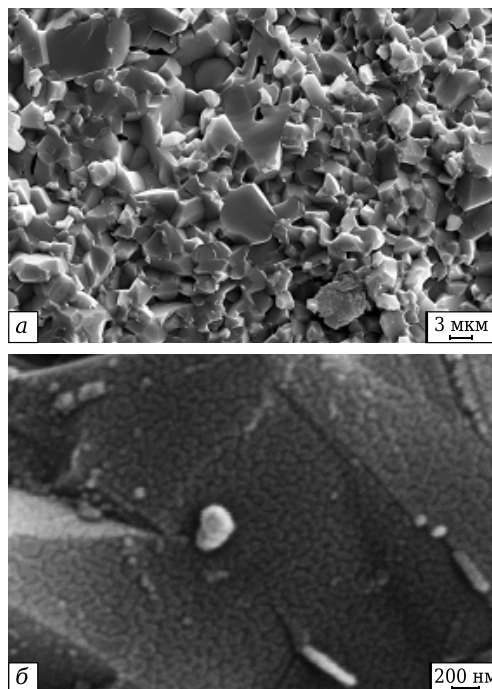


Рис. 10. Характерная микроструктура (а) и структура зерна (б) МКЭ в форме цилиндра (образец № 1): а — $\times 3000$; б — $\times 50000$

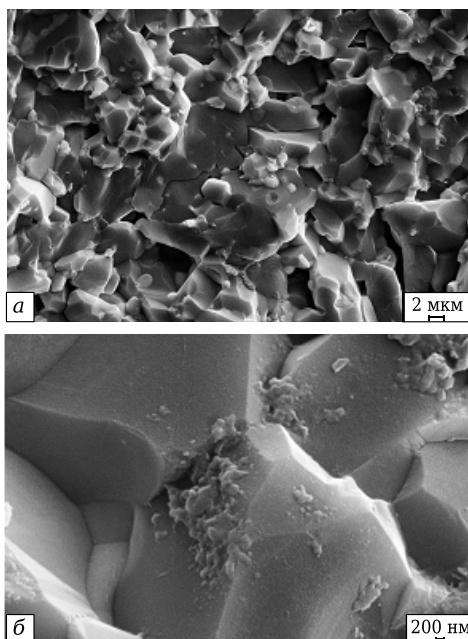


Рис. 11. Микроструктура (а) МКЭ в форме замка (образец № 1) и включения, располагающиеся внутри и по границам зерен основной фазы (б): а — $\times 3000$; б — $\times 15000$

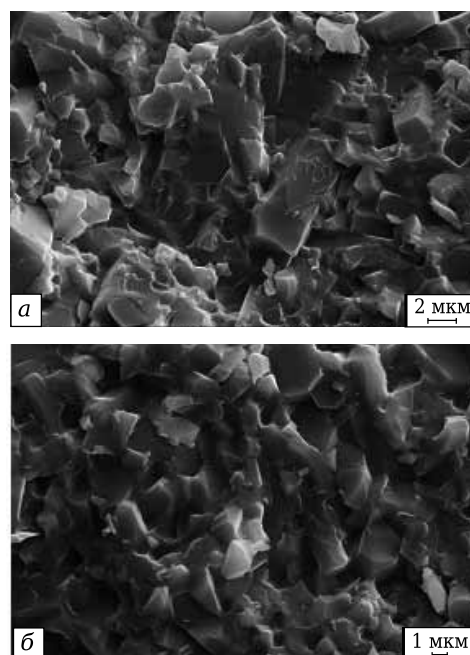


Рис. 13. Микроструктура МКЭ в форме цилиндра (а) и замка (б), образец № 2. $\times 10000$

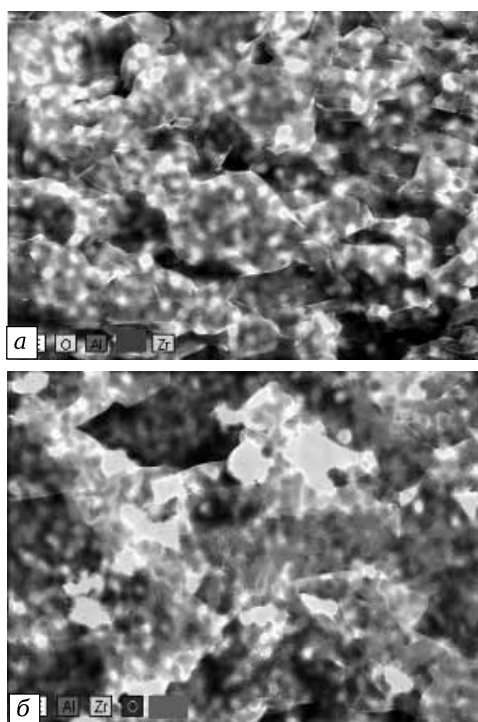


Рис. 12. Распределение химических элементов, входящих в состав образца № 1, в форме цилиндра (а) и замка (б)

Библиографический список

1. Сайт фирмы «TenCate» www.tencate.com.
2. Пат. 2006/0243127 А1 США. Ceramic pellets and composite armor panel containing the same ; опубл. 02.11.2006
3. Бохан, Ю. И. Метод стабилизации вязкой броневой керамики на основе оксидов алюминия и цирко-

являются N и Si в количестве около 33 и 34 % соответственно. Микроструктура МКЭ в форме цилиндра плотная и более однородная по размеру зерен, чем микроструктура замка. Крупные зерна имеют размер около 8 мкм, мелкие менее 5 мкм (рис. 13, б). По данным РСМА, основными элементами в образце являются N и Si, состав которых колеблется в пределах 24–32 и 35–44 % соответственно. Для обоих типов МКЭ характерно наличие примесей Al (2–3 %), Fe (0,4–0,6 %), Zr (1–3 %) и W (2–3 %), которые равномерно распределены в объеме образцов.

Для керамики всех составов характерны высокие значения микротвердости: 14,8–16,0 ГПа для образцов $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZrO}_2$ и 13–15 ГПа для образцов Si_3N_4 (см. табл. 2). Проведенные исследования показали, что, во-первых, уровень свойств керамических материалов, используемых для создания МКЭ, соответствует материалам российских производителей, во-вторых, бронепанели мозаичной конструкции целесообразно применять для защиты спецтехники, где размер заброневой деформации не регламентирован.

ния / Ю. И. Бохан, М. Н. Сарасеко. — www.masters.donntu.edu.ua/2004/mech/kornienko/library/article_10.htm. ■

Получено 07.10.14

© И. Ю. Келина, Н. А. Голубева,
Л. А. Чевыкалова, Л. А. Плясункова, 2014 г.