УДК: 620.168; 623.562.3

DOI: 10.53816/23061456 2022 9-10 116

ОЦЕНКА БАЛЛИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ БРОНЕСТРУКТУР НА ОСНОВЕ КЕРАМИКИ «ИДЕАЛ»

EVALUATION OF BALLISTIC PROPERTIES OF ARMORED STRUCTURE ELEMENTS 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»

С целью определения защитных свойств каждого элемента композитной бронеструктуры проведены баллистические испытания двух органокерамических панелей с разными опорными слоями. Низкая прочность подложки из полиэтилена низкого давления (ПЭНД) позволяет оценить баллистическую стойкость только керамического слоя. Оценить вклад опорного слоя на защитные свойства бронеструктуры возможно при сравнении поведения сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) в составе структуры и в изолированном слое при одинаковых условиях нагружения. *Ключевые слова*: ПЭНД, СВМПЭ, керамика «Идеал», импеданс, металлическая рамка, баллистические испытания, защитные свойства.

To determine the protective properties of each element of the composite armor structure, ballistic tests of two organic-ceramic panels with different support layers were carried out. The low strength of the low-density polyethylene (HDPE) substrate makes it possible to evaluate the ballistic resistance of only the ceramic layer. It is possible to estimate the contribution of the support layer to the protective properties of the armored structure by comparing the functioning of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) in the composition of the structure and in an isolated layer under the same loading conditions. *Keywords*: HDPE, UHMWPE, «Ideal» ceramics, impedance, metal frame, ballistic tests, protective properties.

Введение

Для защиты от пуль с термоупрочнёнными сердечниками лёгкого стрелкового оружия применяются броневые стали и композитные металлокерамические и органокерамические структуры. Последние имеют наименьшую поверхностную плотность, что является важнейшим преимуществом при использовании их в средствах индивидуальной бронезащиты и в авиации. Композитная защитная структура имеет внешний керамический слой, соединённый с помощью полимерного связующего с опорным слоем. В качестве опорного слоя может использоваться сталь, алюминий, материалы на основе арамидных волокон и волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена, а также их сочетания [1–4]. Композитная защитная структура позволяет использовать преимущества своих отдельных составляющих и нивелировать их недостатки.

Твёрдость наружного керамического слоя, достигающая HV 20–30 ГПа [5–8], превосхо-

дит твёрдость термоупрочнённых стальных сердечников, составляющую HV 8–9 ГПа [9]. При встрече с твёрдым керамическим слоем сердечник пули тормозится и разрушается, а его проникание в керамический слой происходит только после разрушения керамики под действием вызванных ударом растягивающих и сдвиговых напряжений. Чем больше твёрдость керамического слоя и выше его трещиностойкость, тем больше времени до начала разрушения керамики, и тем большая часть кинетической энергии пули рассеивается в ней [4, 5, 7, 10].

Сам по себе керамический слой не является эффективной защитой из-за низкой прочности керамики на растяжение и изгиб. Удар по керамическому слою вызывает волну сжимающих напряжений в материале. При отражении этой волны от границы тыльного слоя материала и воздуха образуются растягивающие напряжения, приводящие к образованию трещин, и образуется тыльный откол [11].

Для практического использования керамики необходим опорный слой из материала, снижающего уровень отраженных от границы с керамикой волн растяжения. Этот материал также должен обладать высокой прочностью для того, чтобы в дальнейшем остановить преодолевший керамический слой сердечник и движущиеся с ним фрагменты разрушенной керамики.

Процесс взаимодействия ударника с композитным материалом можно разделить на два этапа. На первом происходит разрушение керамического слоя, сопровождающееся торможением и фрагментацией ударника. На втором этапе фрагменты ударника и частицы разрушенной керамики проникают в опорный слой. При этом происходит частичное разрушение и деформация опорного слоя.

Величина и знак отраженной от границы раздела волны напряжения зависят от соотношения величин акустического импеданса граничащих сред [12]. Поэтому эффективная защитная композиционная структура должна состоять из сочетающихся как по механическим, так и по акустическим свойствам материалов. Их оптимальный подбор не может быть осуществлён без учёта взаимодействия отдельных компонентов защитной структуры при ударе и представляет собой нетривиальную задачу. Целью работы является оценка вклада каждого компонента для композиционного защитного материала в баллистическую стойкость структуры в натурном эксперименте.

Методика проведения эксперимента

В работе проведены сравнительные баллистические испытания композиционных образцов двух исполнений, имеющих один и тот же керамический слой и различные подложки. В качестве опорных слоёв были взяты прессованный сверхвысокомолекулярный UD материал Dyneema® и листовой полиэтилен низкого давления (ПЭНД). Эти материалы обладают близкими значениями акустического импеданса [1]. Тогда на первом этапе динамика волн напряжения при взаимодействии ударника с композитом будет одинакова, вплоть до разрушения керамического слоя и начала проникания ударника в подложку. Поскольку прочность ПЭНД подложки мала, можно ожидать, что баллистическая стойкость композита будет определяться вкладом процессов, проходящих в керамическом слое, таких как разрушение и фрагментация ударника, образование трещин в керамике, её фрагментация и ускорение фрагментов, нагрев ударника и керамики, рассеяние волн напряжения.

На втором этапе, когда фрагменты ударника и частицы разрушенной керамики проникают в опорный слой, основную роль будет играть прочность и структура опорного слоя. Сравнивая поведение СВМПЭ в составе структуры и в изолированном слое при одинаковых условиях нагружения, можно оценить вклад опорного слоя и особенности поведения СВМПЭ.

Результатами испытаний являются значения скорости пули при вылете из канала ствола и за преградой. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Скорость полета пули определялась при помощи баллистического регистратора «РБ-1000», расположенного на расстоянии 0,5 м от дульного среза (рис. 2, *a*). На дистанции 6 м от дульного среза, за установленным образцом расположен регистратор скорости полета пули «РС-4М», при помощи которого были получены значения скорости пули за преградой (рис. 2, δ).



Условные обазначения Св.11 – винтавка Св.11; РБ – регистратор баллистический "РБ-1000"; 0 – установленный абразец; РС – регистратор скорости "РС-4М"; 3 – бунажный экран

Рис. 1. Схема эксперимента



Рис. 2. Регистраторы скорости полета пули: а — «РБ-1000»; б — «РС-4М»

Баллистические испытания подложек

Для оценки баллистических свойств применяемых подложек из ПЭНД и СВМПЭ были проведены испытания на их противопульную стойкость. В качестве образцов использовались листы ПЭНД толщиной 6 мм и листы СВМПЭ толщиной 7 мм, закреплённые по двум вертикальным краям. В табл. 1 представлены полученные значения скорости у дульного среза и за преградой.

Снижение скорости пули при пробитии образцов определялось с учётом потери скорости на пути от дульного среза до образца, составляющего в среднем 4 м/с. Снижение скорости для ПЭНД не превысило 4 м/с. При взаимодействии с СВМПЭ скорость пули снизилась на 30 м/с. Потери кинетической энергии пули составили

Таблица 1

	Материал	Скорость полета пули, м/с			0	Потеря
№ выстрела		у дульного среза	за преградой	Снижение скорости, м/с	Снижение скорости на полиэтилене, м/с	кинетической энергии пули при пробитии E_{κ} , Дж
1	ПЭНД	826	820	6	2	17
2	ПЭНД	820	813	7	3	25
3	ПЭНД	828	820	8	4	34
4	СВМПЭ	803	772	31	27	220
5	СВМПЭ	828	794	34	30	252
6	СВМПЭ	831	803	28	24	203

Снижение скорости при пробитии полиэтилена



Рис. 3. Трещины «серебра» на ПЭНД: а — сторона обстрела; б — тыльная сторона

34 и 252 Дж соответственно, то есть 1 % и 7 % начальной кинетической энергии пули.

На образцах ПЭНД границы образовавшихся после выстрела отверстий оказались оплавленными (рис. 3). Диаметр оплавленных отверстий оказался в 3 раза меньше диаметра сердечника пули. На рис. 3 вокруг места попадания пули видно тёмное пятно, вызванное наличием большого количества образовавшихся микротрещин (трещин «серебра»). Площадь образца с трещинами «серебра» является площадью рассеивания энергии пули при пробитии. Эту площадь можно оценить в среднем как 5 см², или 3 калибра. На тыльной стороне образца видны также трещины длиной до 8 мм.

Выстрелы произведены из снайперской винтовки СВД калибра 7,62 мм патронами инд. ГРАУ 7-БЗ-3 с пулей Б-32. Образцы ПЭНД и СВМПЭ после обстрела представлены на рис. 3–5. Снижение скорости пули на дистанции 6 м при отсутствии преграды составило 4 м/с.

При обстреле образца ПЭНД на экране образовывалось одно круглое отверстие, что говорит об отсутствии образования при пробитии образца фрагментов оболочки пули и ударника, а также отсутствии дестабилизирующего воздействия на пулю со стороны подложки.

При испытаниях образцов из СВМПЭ картина разрушения радикально изменилась. На их тыльной стороне при выстреле произошло отслоение материала (рис. 4, δ). В отличие от образцов ПЭНД, образовавшиеся отверстия не были оплавлены, хотя температура плавления обоих материалов составляет примерно 140 °C [13]. На закрепленном за образцом бумажном экране обнаружены многочисленные отверстия, оставленные осколками разрушенных элементов пули. Сердечник пули при этом оказался развёрнут на 90 градусов от линии стрельбы (рис. 5). Отклонение произошло в результате деформирования и разрушения волокон СВМПЭ. Эффективность дальнейшего проникающего действия пули в данном положении значительно снижена.

Баллистические испытания композитных защитных структур

Оценка баллистической эффективности керамики проводилась при испытаниях образцов защитных структур с лицевым керамическим слоем, в качестве которого использовалась плитка композитного материала алмаз-карбид кремния «Идеал». По физическим характеристикам,





Рис. 4. Образец СВМПЭ после обстрела: а — сторона обстрела; б — тыльная сторона



Рис. 5. Экран после обстрела образца СВМПЭ

влияющим на бронестойкость, «Идеал» превосходит традиционные керамические материалы на основе оксида алюминия, карбида кремния и карбида бора (табл. 2) [5–8].

Керамическая плитка была утоплена в металлическую рамку, зазор между ними не превышал 0,5 мм и был заполнен эпоксидной смолой Компаунд ЭК-54А(П). Применение рамки позволяет создать условия, близкие к условиям работы полноразмерного керамического слоя из соприкасающихся плиток. От свободных боковых поверхностей плитки при ударе происходит отражение сжимающих волн напряжения в виде волн растяжения, что приводит к разрушению материала. В работах [14-15] описан механизм распространения волн напряжения при ограничении боковых поверхностей. В этом случае обеспечивается передача волн сжатия через границу раздела двух сред до тех пор, пока волна напряжений снова не достигнет свободной поверхности, после чего так же происходит отражение в виде волны растяжения. Многократные отражения и увеличение пути, по которому проходят падающие волны напряжений, приводят к их затуханию. Однако, передача волн напряжения обеспечивается лишь при близком значении акустического импеданса Z обоих сред, описываемого следующей формулой:

$$Z = \rho \cdot U,$$

где ρ — плотность, кг/м³; U — скорость ударной волны в материале, м/с. Для металлов и керамики при баллистическом ударе скорость ударной волны близка к скорости звука, и можно использовать формулу:

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

где E — модуль упругости, ГПа; c — скорость звука в материале, м/с. Для полимерных материалов скорость ударной волны существенно зависит от скорости удара. Так, для СВМПЭ при ударе со скоростью 800 м/с в направлении, перпендикулярном плоскостям укладки волокон, скорость ударной волны вдвое превосходит скорость ударной волны вдвое превосходит скорость звука [16, 17]. Для ПЭНД ударная адиабата, приведенная в [18], позволяет оценить скорость ударной волны при тех же условиях в 2000 м/с. Применяемые в настоящей работе металлические рамки изготовлены из алюминиевого сплава АМг5м и конструкционной стали Ст3. Значения акустического импеданса перечисленных материалов представлены в табл. 3.

Таблица 2

Материал	Плотность р, кг⁄м ³	Модуль упругости <i>E</i> , ГПа	Скорость звука, м⁄с	Коэффициент трещино- стойкости К _{1С} , МПа∙м ¹²	Твердость HV, ГПа
Спеченный корунд Al_2O_3	3750	375	9800	3,4	16
Реакционно-спеченный карбид кремния SiSiC	3100	329	10300	3,5	21
Реакционно-спеченный карбид бора RSB ₄ C	2550	383	13000	3,5	30
Композит алмаз-карбид кремния «Идеал»	3350	754	15000	4,5	65

Физические и механические свойства керамического материала «Идеал»

Эпичения икустического империанах						
Материал	Плотность р, кг/м ³	Скорость звука, м/с	Акустический импеданс <i>Z</i> , 10 ⁴ Пас/м			
Алюминиевый сплав АМг5м	2650	5185	1375			
Конструкционная сталь Ст3	7850	5170	4060			
Композит «Идеал»	3350	15000	5025			
СВМПЭ	970	4000	390			
ПЭНД	960	2000	190			

Значения акустического импеданса в материалах

Структура образцов для баллистических испытаний во всех случаях была одна и та же (рис. 6). Для соединения керамической плитки с подложкой использовалась плёнка ПВБ толщиной 760 мкм. Снаружи образцы были «обмотаны» слоями арамидной ткани Twaron CT716 через монтажную плёнку Eva так, что два ее слоя были расположены с лицевой стороны, а четыре — с тыльной.

В качестве материала подложки были также использованы ПЭНД и СВМПЭ. Оценка защитных свойств керамики проводилась путем измерения скорости полета пули за преградой. Полученные значения характеризуют снижение скорости пули при прохождении сквозь керамический слой. Было испытано 3 образца:

 – бронепанель с подложкой из ПЭНД толщиной 6 мм, керамическим слоем толщиной 7 мм и металлической рамкой из конструкционной стали Ст3 толщиной 7 мм;



Рис. 6. Схема образца композитной структуры

 – бронепанель с подложкой из СВМПЭ толщиной 7 мм, керамическим слоем толщиной 7 мм и металлической рамкой из АМг5м толщиной 8 мм;

 – бронепанель с подложкой из СВМПЭ толщиной 7 мм, керамическим слоем толщиной 7 мм и металлической рамкой из конструкционной стали Ст3 толщиной 7 мм.

Выбор состава образцов объясняется необходимостью оценки баллистической эффективности керамического материала «Идеал» с учетом воздействия каждого элемента структуры. Применение подложки из ПЭНД исключает влияние прочностных свойств опорного слоя на защитные свойства композитного образца. Стальная рамка из Ст3 обеспечивает необходимые условия оценки свойств керамики, обладая наиболее близким значением акустического импеданса. Сочетание элементов бронеструктуры во втором образце позволяет оценить защитные свойства структуры целиком, однако алюминиевый сплав АМг5м в качестве материала металлической рамки характеризуется более низким значением акустического импеданса, чем у керамики «Идеал», что позволит наглядно оценить влияние разницы импеданса двух сред на защитные свойства композита.

Баллистические испытания проводились в испытательном центре АО «НПО Спецматериалов» в соответствии с ГОСТ 34286-2017 «Бронеодежда. Классификация и обшие технические требования». За образцом был установлен фанерный экран, улавливающий осколки разрушенных элементов пули. Выстрелы производились из снайперской винтовки СВД калибра 7,62 мм патронами 7Н13 с пулей ПП. Методика эксперимента аналогична описанной ранее.

Скорость полета пули, Поглошение Снижение м/с Снижение кинетической № Состав скорости на скорости, энергии пули при образца бронеструктуры структуре, у дульного за м/с пробитии структуры, преградой м/с среза Дж ПЭНД + «Идеал» + Ст3 230 589 3047 819 586 1 СВМПЭ + «Идеал» + 2 820 820 817 3140 АМг5м СВМПЭ + «Илеал» + 3 825 825 822 3179 Ст3

Снижение скорости при пробитии бронеструктур

Значения снижения скорости пули при прохождении через преграду представлены в табл. 4.

Первый образец, материалом подложки которого является ПЭНД, был пробит, а снижение скорости пули при пробитии составило 589 м/с. Оно было обеспечено при взаимодействии пули именно с керамикой, так как материал ПЭНД обладает очень низкой баллистической стойкостью. Защитное действие наружного керамического слоя сводится к разрушению сердечника, поглощению части его кинетической энергии в процессе торможения в уже разрушенной керамике и увеличению площади воздействия оставшейся энергии удара на подложку.

После испытания на противопульную стойкость образца с ПЭНД на экране были обнаружены осколки сердечника (рис. 7), масса которых составила 1,4 г и 1,85 г. Масса сердечника пули ПП патрона 7Н13 составляет 5,34 г, следовательно, произошло «срабатывание» и разрушение сердечника при пробитии керамического слоя примерно на 2 г. Расстояние между осколками составило 95 мм. Дестабилизация осколков сердечника и его разрушение подтверждают высокую баллистическую эффективность керамики «Идеал».

Основным механизмом диссипации энергии удара является пластическая деформация ударника, а также разрушение керамики. Кинетическая энергия пули при вылете составила $E_{\kappa 0} = 3156$ Дж, а общая энергия разрушенных осколков пули составила $E_{\kappa} = 86$ Дж. Эффективность рассеивания энергии удара зависит от высокого показателя трещиностойкости керамики. Для повышения защитного действия внешнего керамического слоя необходимо обеспечить ком-



Таблица 4



Рис. 7. Осколки разрушенного сердечника после испытаний образца № 1: а — места попадания по экрану; б — размеры осколков; в — склеенные осколки

промиссное сочетание обратно пропорциональных свойств — твердости и трещиностойкости. Для керамического материала «Идеал» обе характеристики имеют высокие значения (табл. 2).

На рис. 8 представлен вид деформированной подложки из ПЭНД после испытаний.

Единичная трещина разрушения в ПЭНД после испытаний в составе бронеструктуры могла возникнуть в результате дестабилизации пули при пробитии керамического слоя. Тыльный прогиб и трещины «серебра» занимают всю площадь подложки (рис. 8), что указывает на увеличение площади воздействия оставшейся кинетической энергии пули и осколков керамики на подложку и на эффективность рассеивания энергии удара в керамике.

На рис. 8, б на стороне обстрела в 1–1,5 см от сквозного отверстия видны частицы керамики на поверхности подложки. Это позволяет оценить диаметр конуса разлетающихся осколков керамики в 3–4 диаметра сердечника.

При испытаниях на противопульную стойкость второго и третьего образцов, в состав которых входит подложка из СВМПЭ, бронепанели не были пробиты, а слоистая структура опорного слоя позволила количественно оценить процент пробития его слоев. Для второго образца это значение составило 31 %, а для третьего — 27 % от общего количества слоев. В табл. 5 представлены результаты испытаний бронеструктур со сверхвысокомолекулярным полиэтиленом.

Сравнение результатов испытаний при использовании стальной и алюминиевой рамки показывает, что образец со стальной рамкой обладает лучшими защитными свойствами. Количество пробитых слоёв подложки уменьшилось, несмотря на то, что скорость пули была выше, чем при использовании алюминиевой рамки.



Рис. 8. Вид деформированной подложки из ПЭНД после испытаний: а — вид сбоку; б — вид со стороны обстрела

Это может быть связано с большим коэффициентом прохождения волн напряжения через границу керамика-металл рамки в случае рамки из стали.

При послойном разборе подложки из СВМПЭ были обнаружены осколки разрушенных сердечников пуль (рис. 9). Вид осколков сердечников говорит об испытанной ими пластической деформации и фрагментации при торможении в керамическом слое.

Обсуждение результатов

Сопоставление результатов баллистических испытаний двух исполнений композитных

Таблица 5

Параметр	СВМПЭ + «Идеал» + АМг5м	СВМПЭ + «Идеал» + Ст3		
Масса пакета СВМПЭ, г	102	102		
Масса пробитого пакета слоев СВМПЭ, г	32	27		
Масса одного слоя, г	1,875			
Общее количество слоев, шт.	55			
Количество непробитых слоев, шт.	38	40		
Количество пробитых слоев, шт.	17	15		
Процент пробития, %	31	27		

Количество пробитых слоев СВМПЭ



Рис. 9. Разрушенные сердечники пуль после испытаний: а — образца № 2; б — образца № 3

структур с разными опорными слоями позволяет сделать выводы о роли каждого из слоёв в составе композита. При использовании в качестве опорного слоя полиэтилена низкого давления ПЭНД, этот слой сам по себе не имеет значимых защитных свойств. Поэтому результат по оценке бронепробития целиком связан со свойствами керамического слоя. Важно отметить, что условия работы керамического слоя приближены к тем, что наблюдаются для композита керамика– СВМПЭ. Для опорного слоя из СВМПЭ к защитным свойствам собственно керамики добавляются защитные свойства опорного слоя. Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов.

Снижение скорости пули при пробитии композитной структуры с подложкой из ПЭНД составило 589 м/с, при этом произошло «срабатывание» и разрушение сердечника примерно на 2 г. Качество керамики подтверждает и дестабилизация осколков сердечника. Образцы бронеструктур, в состав которых входит подложка из СВМПЭ, не были пробиты. Количество пробитых слоев СВМПЭ составило 31 % и 27 % от общего количества слоев. Сравнение результатов показывает, что образец со стальной рамкой обладает лучшими защитными свойствами, что обусловлено большим коэффициентом прохождения волн напряжения через границу керамика–сталь.

Выводы

Проведена оценка защитных свойств элементов бронеструктур на основе керамики «Идеал». Испытания баллистической стойкости керамики проводились в составе структуры, где материалом подложки являлся ПЭНД, обладающий низкой прочностью. Защитные свойства и вклад опорного слоя из СВМПЭ были оценены путем сравнения его поведения в составе структуры и в изолированном слое. С целью создания условий, близких к условиям работы полноразмерного керамического слоя из соприкасающихся плиток, были применены металлические рамки из стали и алюминия. Разные материалы рамок, применяемые в настоящей работе, позволили наглядно оценить влияние разницы импеданса двух граничащих сред на защитные свойства керамического слоя.

Литература

1. Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Маринин В.М., Чистяков Е.Н. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования. — Москва.: изд-во РадиоСофт, 2008. 406 с.

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

3. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Материалы и структуры легкой бронезащиты: учебник. — Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 191 с.

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

5. 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.

6. 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. Pp. 281–288.

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

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. 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.

10. 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.

11. Кобылкин И.Ф. Пробивание двухслойных преград с внешним керамическим слоем и оптимизация их структуры // Физика горения и взрыва. 2017. № 4 (53). С. 126–133.

12. 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).

13. Галыгин В.Е., Баронин Г.С., Таров В.П., Завражин Д.О. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов: учебное пособие. — Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 180 с.

14. 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. Pp. 535–541.

15. Сильников Н.М., Юрченко Н.М., Михайлин А.И., Гук И.В. Баллистические испытания органокерамических панелей на основе керамики «Идеал» // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2022. Вып. 7–8 (169–170). С. 156–166.

16. Lässig T., Nguyen L., May M., Riedel W., Hiermaier S., Heisserer U., van Werff H. A nonlinear orthotropic hydrocode model for ultrahigh molecular weight polyethylene in impact simulations // International Journal of Impact Engineering. 2013. V. 75. Pp. 110–122. 17. Hazzel P, Appleby-Thomas G., Trinquant X., Chapman D. In-fibre shock propagation in Dyneema® // Journal of Applied Physics. 2011. V. 110.

18. Кунижев Б.И., Цечоева А.Х., Кушхатлоков С.Л., Кадыкоева М.Х. Ударная адиабата и оценка температуры ударно-сжатого полиэтилена // Научные известия. 2015. № 1. С. 89–93.

References

1. Grigoryan V.A., Kobylkin I.F., Marinin V.M., Chistyakov E.N. Materialy i zashchitnye struktury dlya lokal'nogo i individual'nogo bronirovaniya (Materials and protective structures for local and individual reservations). — Moscow: RadioSoft, 2008. 406 p.

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

3. Kobylkin I.F., Selivanov V.V. Materialy i struktury legkoj bronezashchity: uchebnik (Materials and structures of light body armor: textbook). — Moscow.: Moscow State Technical University Publishing House, 2014. 191 p.

4. Anastasiadi G.P., Silnikov M.V. Rabotosposobnost' bronevyh materialov (The performance of armor materials). — St. Petersburg: Asterion, 2004. 624 p.

5. Shevchenko V.YA., Silnikov M.V., Dolgin A.S. et al. Issledovanie zashchitnyh svojstv novogo keramicheskogo materiala «Ideal» (Study of the protective properties of the new ceramic material «Ideal») // Izvestiya Rossijskoj akademii raketnyh i artillerijskih nauk (Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences). 2021. № 4 (119). Pp. 87–96.

6. 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. Pp. 281–288.

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

8. Silnikov M.V., Shevchenko V.YA., Mikhaylin A.I. et al. Kompozitnye organokeramicheskie paneli dlya zashchity ot pul' kalibra 7,62 mm i 5,45 mm s termouprochnennym serdechnikom na osnove keramiki almaz-karbid kremniya s reguliruemoj vzaimosvyazannoj strukturoj (Composite organo-ceramic panels for protection against 7.62 mm and 5.45 mm bullets with heatstrengthened diamond-silicon carbide core with adjustable interconnected structure) // Izvestiya Rossijskoj akademii raketnyh i artillerijskih nauk (Proceedings of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences). 2021. №3 (118). Pp. 107–113.

9. Danilin G.A., Ogorodnikov V.P., Zavolokin A.B. Osnovy proektirovaniya patronov k strelkovomu oruzhiyu: uchebnik (Small arms cartridge design basics: textbook). — St. Petersburg: Baltic State Technical University, 2017. 368 p.

10. Garshin A.P., Kulik V.I., Nilov A.S. Udaroprochnye materialy na osnove tekhnicheskoj keramiki: dostizheniya i perspektivy povysheniya ih ballisticheskoj effektivnosti (Impact-Resistant Materials Based on Technical Ceramics: Achievements and Prospects for Increasing Their Ballistic Efficiency) // Novye ogneupory (New refractories). 2016. № 4. Pp. 53–67.

11. Kobylkin I.F. Probivanie dvuhslojnyh pregrad s vneshnim keramicheskim sloem i optimizaciya ih struktury (Penetration of twolayer barriers with an external ceramic layer and optimization of their structure) // Fizika goreniya i vzryva (Physics of combustion and explosion). — 2017. № 4 (53). Pp. 126–133.

12. 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).

13. Galygin V.E., Baronin G.S., Tarov V.P., Zavrazhin D.O. Sovremennye tekhnologii polucheniya i pererabotki polimernyh i kompozicionnyh materialov: uchebnoe posobie (Modern technologies for the production and processing of polymeric and composite materials: textbook)– Tambov: Publishing House of FGBOU VPO «TSTU», 2012. 180 p.

14. 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. Pp. 535–541.

15. Silnikov N.M., Yurchenko N.M., Mikhailin A.I., Guk I.V. Ballisticheskie ispytaniya organokeramicheskih panelej na osnove keramiki «Ideal» (Ballistic tests of organic-ceramic panels based on «Ideal» ceramics) // Voprosy oboronnoj tekhniki (Questions of defense technology). Ep. 16. Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. 2022. Issue 7–8 (169–170). Pp. 156–166.

16. Lässig T., Nguyen L., May M., Riedel W., Hiermaier S., Heisserer U., van Werff H. A nonlinear orthotropic hydrocode model for ultrahigh molecular weight polyethylene in impact simulations // International Journal of Impact Engineering. 2013. V. 75. Pp. 110–122.

17. Hazzel P, Appleby-Thomas G., Trinquant X., Chapman D. In-fibre shock propagation in Dyneema® // Journal of Applied Physics. 2011. V. 110.

18. Kunizhev B.I., Tsechoeva A.Kh., Kushkhatlokov S.L., Kadykoeva M.Kh. Udarnaya adiabata i ocenka temperatury udarno-szhatogo polietilena (Shock adiabat and temperature estimation of shock-compressed polyethylene) // Nauchnye izvestiya (Scientific news). 2015. № 1. Pp. 89–93.