

УДК 678.84

В.С. Ерасов<sup>1</sup>, А.В. Лавров<sup>1</sup>, А.Н. Луценко<sup>1</sup>, А.В. Гриневиц<sup>1</sup>**К ВОПРОСУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕРМОУПРОЧНЕННОГО  
УДАРНИКА С КЕРАМИЧЕСКОЙ ПРЕГРАДОЙ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-69-75

*Предложена инженерная методика исследования критериев функционирования керамических бронезлементов с возможностью комплексной оценки запреградного действия.*

*Для серии модельных образцов на основе корундовой керамики получены зависимости основных критериев функционирования от толщины бронезлемента.*

*Исследован характер разрушения термоупрочненных сердечников пуля Б32 при взаимодействии с керамическими бронезлементами разных толщин.*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2 «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

**Ключевые слова:** керамическая броня, сердечник, пуля, критерий, модель, энергоемкость.

*The engineering method of study the criteria of performance for the ceramic armor elements with the possibility of an integrated assessment after barrier action is suggested.*

*For a series of model samples based on alumina ceramics depending to the main criteria for the operation of the thickness of the armor elements are received.*

*The nature of the destruction of heat-treated core bullets B32 interaction with ceramic armor elements of different thicknesses is researched.*

*Work is executed within implementation of the complex scientific direction 2 «Fundamental the oriented researches, qualification of materials, non-destructive testing» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** ceramic armor, core, bullet, criterion, model, energy capacity.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Бронеконпозиции на основе керамики все чаще заменяют традиционные металлические системы в составе как изделий военной техники, так и средств индивидуальной бронезащиты [2–5]. В качестве материалов бронезлементов применяются, главным образом, карбид бора ( $B_4C$ ), карбид кремния ( $SiC$ ) и оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ) [4, 5], причем последний нашел наиболее широкое применение благодаря сочетанию хорошей технологичности и высоких эксплуатационных свойств.

Объем информации в части исследования броневой керамики в настоящее время заметно уступает аналогичным данным в области металлической брони. Прямое заимствование методик исследования металлических бронематериалов для оценки свойств керамической брони часто невозможно из-за различного механического поведения металлических и керамических материалов. Так, энергоемкость металлической преграды определяется, как правило, по разности скоростей пули до и после ее прохождения [4]. При обстреле керамических

элементов данный метод неприменим вследствие фрагментации пули и керамики и образования потока осколков.

Поскольку для правильного применения материала в конструкции необходимо иметь полный набор данных о его свойствах [1, 6–8], разработка методик оценки функциональных характеристик керамических бронематериалов является весьма актуальной задачей.

В данной работе рассматривается предложенная авторами методика оценки энергоемкости керамического бронезлемента по запреградному воздействию потока осколков на специальные баллистические экраны. Кроме того, проводится анализ процесса взаимодействия термоупрочненного сердечника с керамическими преградами разных толщин.

**Материалы и методы**

Для исследования характера взаимодействия керамического бронезлемента и пули образцы из спеченного порошка  $Al_2O_3$ , установленные в специальном приспособлении, обстреливали пулями Б32

калибра 7,62 мм. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Керамические образцы (пластины) размещали по нормали относительно направления обстрела с опорой на баллистический экран из алюминиевого сплава. С тыльной стороны экрана размещали ряд аналогичных экранов, расположенных с одинаковым интервалом между ними. Экраны устанавливали в пазах приспособления конструкции ВИАМ (рис. 2). После установки экранов приспособление накрывали кожухом для улавливания фрагментов пули (на рис. 2 не показан).

Габаритные размеры керамического образца выбирали, исходя из следующих требований:

- обеспечение попадания в центральную часть образца на данной дистанции;
- размеры образца должны превышать диаметр основания конуса разрушения с учетом рассеивания пули.

Таким образом, керамические пластины имели размеры 100×100 мм при толщине от 2 до 12 мм.

Обстрел производился по нормали к поверхности керамической пластины, ударная скорость составляла ~820 м/с.

Предложенная методика позволяет оценивать следующие основные эффекты, которые имеют место при взаимодействии пули и керамического бронезлемента [9, 10]:

- кинетический эффект, заключающийся в поглощении бронезлементами части кинетической энергии пули (энергоемкость бронезлемента);
- деструктивный эффект, заключающийся в деформировании или разрушении пули при ударе о преграду;
- диссипативный эффект, заключающийся в распределении кинетической энергии пули на большую площадь поражения.

По конструктивному оформлению данная методика схожа с известными методиками баллистических испытаний, используемыми для исследования баллистических характеристик осколков пули приспособления с набором запреградных экранов [11]. Однако в отличие от методик, предполагающих оценку массы отдельного осколка пули по диаметру отверстия в экране и скорости осколка по глубине его проникания, данная методика позволяет производить интегральную оценку запреградного действия потока осколков пули и керамического бронезлемента.

Как было отмечено ранее, определение энергоемкости преграды по разности скоростей пули до и после ее прохождения в случае керамических преград невозможно. В связи с этим приняты следующие допущения:

- поток фрагментов пули и керамической преграды, образованный в результате взаимодействия пули и керамического элемента, воздействует на баллистический экран аналогично жесткому ударнику с конической головной частью;
- кинетическая энергия пули переходит исключительно в работу пробивания экранов и разрушения керамического образца.

Таким образом, для определения кинетического эффекта можно воспользоваться моделью пробивания тонкого листа [12], выгодно отличающейся от известных моделей [13, 14] отсутствием таких параметров, как скорость и размеры ударника.

Согласно работе [12] энергия ( $W$ ), затраченная на пробивание экрана из пластичного материала ударником с конической головной частью, определяется по формуле:

$$MV_{bl}^2/2 \approx W = (\pi d^2/4) H \sigma_r, \quad (1)$$

где  $M$  – масса ударника;  $V_{bl}$  – характерная для данной пары ударник/преграда баллистическая скорость;  $d$  – диаметр образованного ударником отверстия;  $H$  – толщина экрана;  $\sigma_r$  – эффективное сопротивление образованию в тонком листе отверстия с цилиндрическим бортом.

Величина  $\sigma_r$  для  $H/d < 1/3$ , согласно работе [12], составляет:

$$\sigma_r = (2/3 + 4(H/d)) \sigma_{0,2}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{0,2}$  – статический предел текучести материала экрана.

Учитывая постоянство величины  $V_{bl}$  в широком диапазоне ударных скоростей (рис. 3), формула (1) позволяет оценить величину присоединенной массы, а также проводить расчет энергии пробивания экрана с использованием только геометрических характеристик зоны поражения (толщина экрана и средний диаметр пробитого отверстия).

С учетом вышеизложенного баллистические экраны должны иметь следующие свойства:

- материал экранов – обладать стабильными механическими свойствами с малым разбросом значений, в том числе обеспечивать постоянство величины  $V_{bl}$  в широком диапазоне ударных скоростей;
- толщина экранов – обеспечивать пробивание порядка десяти экранов при испытании одного образца для уменьшения вклада низкоскоростного участка кривой  $V_r = f(V_0)$  (рис. 3).

В данной работе в качестве экранов использовали прямоугольные листы толщиной 2 мм из сплава АМг6М ( $\sigma_{0,2} = 147$  МПа) с размерами ~200×200 мм.

При расчете энергии пробивания последних экранов необходимо учитывать увеличение работы пробивания вблизи предельной баллистической скорости (участок кривой вблизи начала координат, рис. 3). В этом случае уточненный расчет можно проводить, например, с учетом размеров зоны пластического выпучивания [15].

Для определения деструктивного (дробящего) эффекта производится сбор осколков сердечника и определение их размеров и массы. Количественно деструктивный эффект можно выразить следующим образом:

$$D = m_f/m_0, \quad (3)$$

где  $m_0$  – масса пули, г;  $m_f$  – масса наиболее крупного фрагмента сердечника, г.

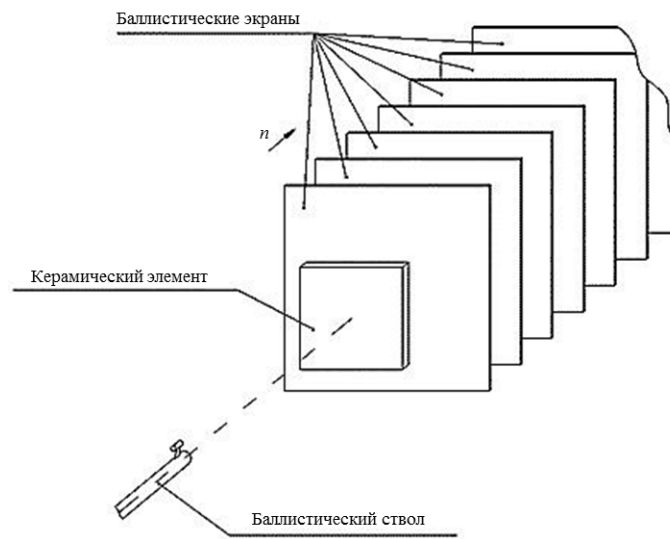


Рис. 1. Схема обстрела керамических бронепластин

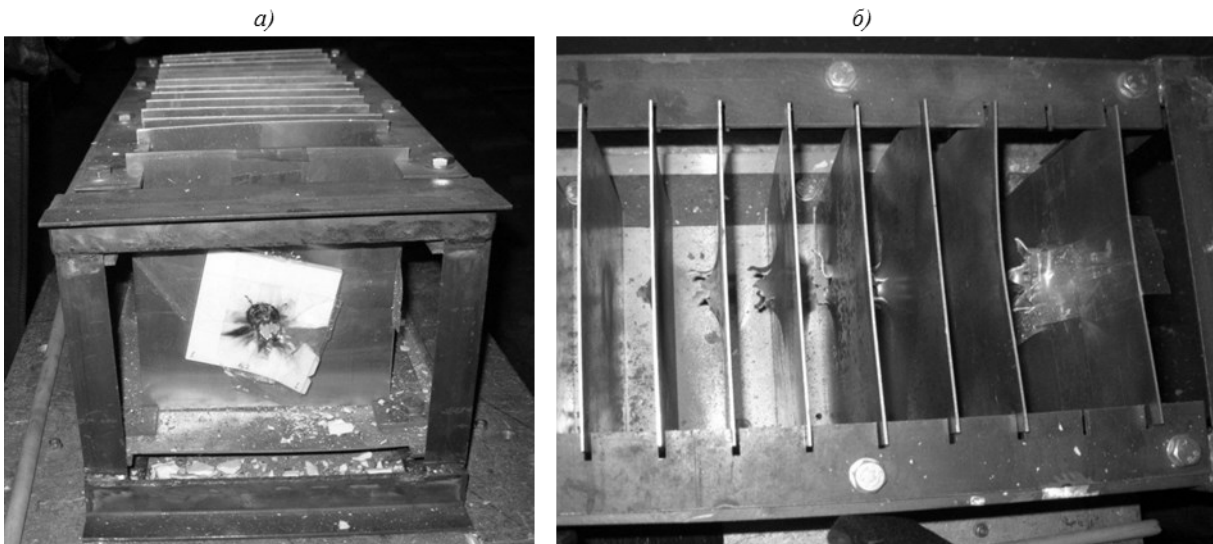


Рис. 2. Приспособление с закрепленной керамической пластиной после проведения испытаний:  
а – вид спереди; б – вид сверху

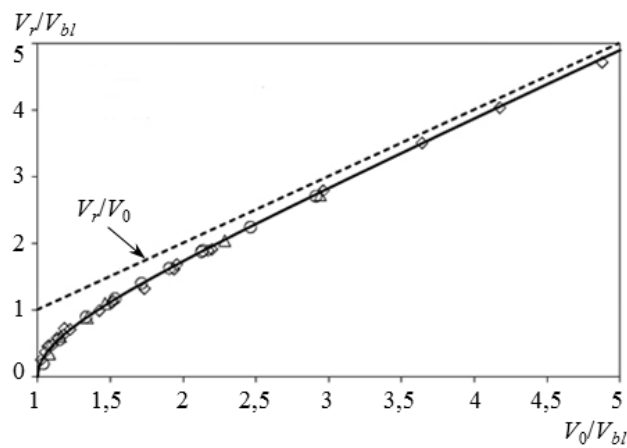


Рис. 3. Зависимость между запреградной ( $V_r$ ) и ударной ( $V_0$ ) скоростями [12]



Рис. 4. Внешний вид керамического образца толщиной 8 мм и баллистических экранов после испытаний

Определение диссипативного эффекта производится путем замера среднего диаметра отверстия на опорном экране (рис. 4). Количественно диссипативный эффект определяется по формуле:

$$R = d_A^2 / d_p^2, \quad (4)$$

где  $d_A$  – средний диаметр отверстия в экране, мм;  $d_p$  – номинальный диаметр ведущей части пули, мм.

### Результаты

Результаты баллистических испытаний по предложенной методике пластин из спеченного порошка  $Al_2O_3$  в диапазоне толщин 2–12 мм следующие:

- общий вид образца и экранов после баллистических испытаний приведен на рис. 4;
- график зависимости величины  $D$  от толщины керамического образца представлен на рис. 5 (массу пули принимали равной 10 г). Величина  $D$  имеет слабую зависимость от толщины керамического образца. Для всех толщин керамических образцов наблюдался значительный разброс параметра  $D$ ;
- график зависимости величины  $R$  от толщины образца, характеризующий диссипативный эффект керамических элементов, представлен на рис. 6 (величина  $R$  монотонно возрастает с увеличением толщины керамической пластины);
- график зависимости энергоемкости керамического элемента от его толщины, характеризующий кинетический эффект керамических элементов, представлен на рис. 7 (для построения графика использовали результаты испытаний одного образца каждой толщины, расчет проводился по формулам (1) и (2) без учета начального участка кривой  $V_r=f(V_0)$ ).

Результаты испытаний, представленные на рис. 5–7, показывают, что вышеуказанные эффекты имеют неравнозначное влияние на функционирование бронезащитного элемента в конструкции. Для испытанных толщин керамических пластин деструктивный эффект, рассчитанный по формуле (3), имеет весьма слабую зависимость от толщины пластины. Кроме того, для керамических элементов с толщинами от 2

до 8 мм фрагменты пули сохраняются в свинцовой рубашке после прохождения керамического элемента и некоторого количества запреградных экранов, что также нивелирует деструктивный эффект для данных толщин. Таким образом, при оценке деструктивного эффекта следует учитывать не только дробление сердечника на фрагменты, но и степень освобождения их от рубашки.

При увеличении толщины керамического образца растет доля кинетической энергии пули, поглощенной образцом, а также увеличивается средний диаметр отверстия на опорном экране. Представленные зависимости могут быть использованы при разработке энергоемких подложек комбинированных преград. Следует отметить, что полученные результаты для кинетического эффекта являются его нижней оценкой вследствие малой жесткости опорного экрана.

Для установления механизма разрушения сердечника пули при его взаимодействии по нормали с керамической преградой представляет интерес изучение фрагментов разрушенного сердечника.

Результаты исследований показали, что характер разрушения сердечника определяется толщиной бронепластины.

При использовании керамической пластины толщиной 2 мм, установленной с опорой на лист 2 мм из сплава АМг6М, происходит дробление сердечника на три фрагмента: оживальной, хвостовой и центральной, обладающий наибольшей длиной. Поверхности разрушения располагаются практически перпендикулярно оси сердечника, оживальная часть сердечника практически не имеет повреждений или имеет небольшое выкрашивание носика.

Описанный характер разрушения сердечника является следствием протекания в нем волновых процессов, что соответствует данным, приведенным в работах [14, 16]. В момент удара в пластине и сердечнике возникают волны напряжений сжатия. При разрушении преграды в сердечнике возникают волны разгрузки, в результате чего происходят отколы оживальной и хвостовой частей.

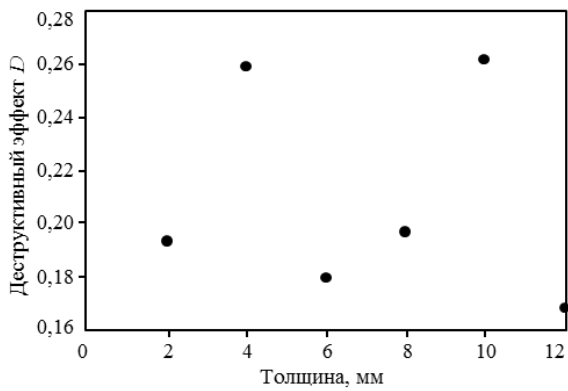


Рис. 5. Зависимость величины  $D$  от толщины образца

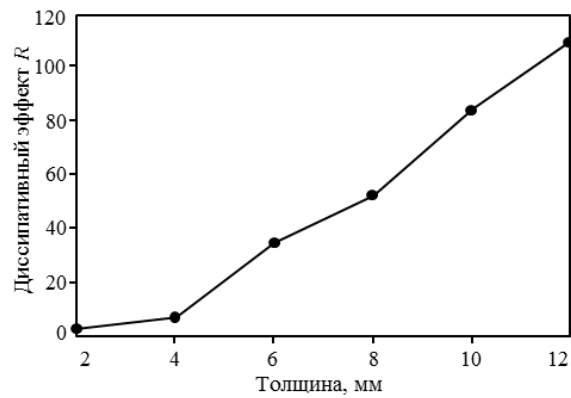


Рис. 6. Зависимость величины  $R$  от толщины образца

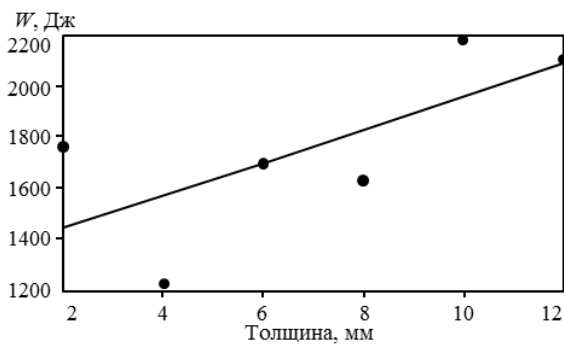


Рис. 7. Зависимость энергоемкости керамического элемента от его толщины

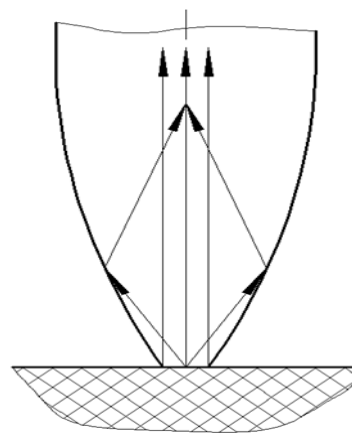


Рис. 8. Схема взаимодействия радиальных волн

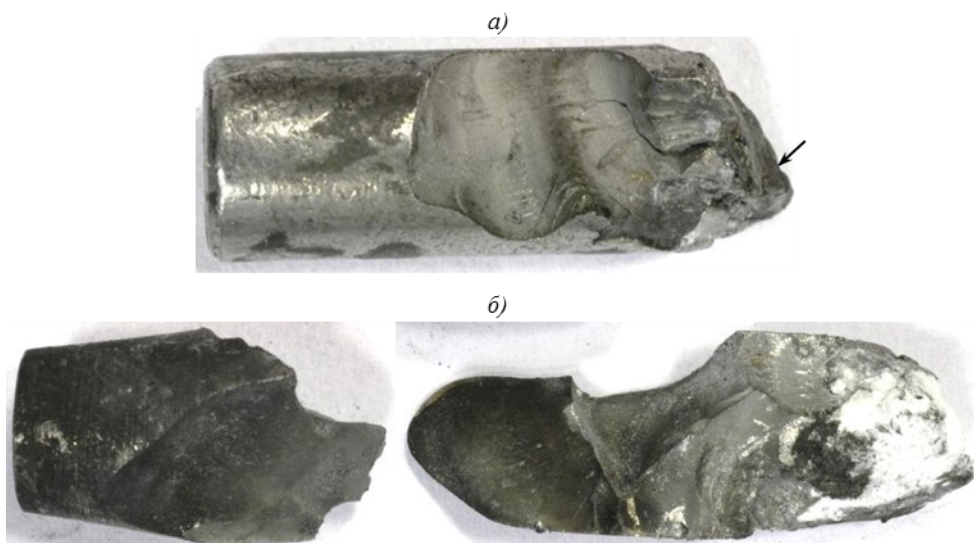


Рис. 9. Внешний вид фрагментов бронебойных сердечников пуль калибров 7,62 (а) и 12,7 мм (б) после взаимодействия с керамическими преградами

При увеличении толщины керамической преграды до 4 мм участок разрушения, расположенный в хвостовой части, смещается в сторону головной части сердечника, что подтверждает волновой характер данного явления.

Начиная с толщины керамической пластины, равной 4 мм, встречается разрушение сердечника вдоль его оси вращения. Такой характер разрушения, по-видимому, также носит волновой характер и может быть объяснен следующим образом (рис. 8). В момент удара в сердечнике возникает волна сжатия. При этом часть волны, имеющая радиальную составляющую (расходящаяся волна), отражается от боковых поверхностей сердечника в виде сходящейся волны растяжения, которая сходится в его центре и при достаточной своей амплитуде может вызвать разрушение материала [16]. Согласно работе [17] напряжение в стержне при прохождении через него продольной упругой волны равно:

$$\sigma = \rho v c, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность вещества стержня;  $v$  – массовая скорость вещества стержня;  $c$  – скорость распространения продольной волны в стержне.

Если  $\rho$  и  $c$  являются константами (при данных условиях испытаний), то величина напряжений будет определяться величиной массовой скорости, которая, в свою очередь, зависит от жесткости преграды. Жесткость преграды определяется ее волновым сопротивлением, которое рассчитывается следующим образом:

$$\rho c \approx \sqrt{\rho E}, \quad (6)$$

где  $E$  – модуль упругости материала преграды, а также ее геометрическими характеристиками и условиями опирания.

Таким образом, при прочих равных условиях массовая скорость вещества ударника будет возрастать при увеличении толщины керамической пластины.

Скорость сходящихся волн определяется по формуле:

$$v_p = v_0 \cos \alpha, \quad (7)$$

где  $v_p$  – массовая скорость в сходящейся волне;  $v_0$  – массовая скорость в исходной волне (направленной вдоль оси ударника);  $\alpha$  – угол между направлением сходящейся волны и осью ударника.

При небольших значениях осевой массовой скорости продольного разрушения сердечника в результате сложения сходящихся волн происходить не будет, что имеет место в случае керамической пластины толщиной 2 мм.

При увеличении толщины керамической пластины повышаются ее жесткость и массовая скорость материала сердечника, в результате чего начинает встречаться разрушение сердечника вдоль его оси.

В целом можно заключить, что откол хвостовой части сердечника перпендикулярно его оси, наблюдавшийся для керамики малой толщины (2 и 4 мм), с увеличением толщины керамических пластин сменяется разрушением в результате образования продольных осевых трещин, переходящих в участки долома под углом к оси сердечника (отрыв при кручении).

Длина продольных трещин возрастает с увеличением толщины керамической пластины. При большой толщине керамических пластин в ряде случаев наблюдается полное продольное разрушение сердечника. Поверхность излома при этом для продольных трещин имеет периодическую структуру (с периодом порядка диаметра сердечника), что может быть связано с образованием нескольких последовательных отколов вдоль его оси.

При толщине керамических образцов 10 и 12 мм на поверхности излома сердечников наряду с участками хрупкого разрушения в ряде случаев наблюдались изломы с пластически деформированными участками (показано стрелкой на рис. 9, а). Такой характер поверхности излома, вероятно, связан с разогревом материала сердечника при прохождении керамической преграды значительной толщины.

Периодическое строение макрорельефа продольного излома характерно не только для пуль калибра 7,62 мм, но и для пуль больших калибров. На рис. 9 для сравнения показан внешний вид поверхности излома для пуль калибра 7,62 и 12,7 мм после удара по керамической преграде; в обоих случаях излом имеет периодическое строение.

### Обсуждение и заключения

Предложенная методика исследования критериев функционирования керамических бронезащитных элементов позволяет проводить комплексную оценку запреградного действия потока фрагментов бронезащитного элемента и пули. Расчеты проводятся исключительно исходя из геометрических параметров перфорированных экранов, что значительно упрощает процесс по сравнению с методиками, требующими знания геометрических параметров ударника, его массы и скорости [13, 14].

Для серии модельных образцов на основе корундовой керамики получены зависимости основных критериев функционирования (кинетический, деструктивный и диссипативный эффекты) от толщины бронезащитного элемента. Показано неравнозначное влияние данных критериев на функционирование бронезащитного элемента. Установлено, что при оценке деструктивного эффекта следует учитывать не только фрагментацию бронезащитного сердечника, но и степень освобождения фрагментов сердечника от удерживающей их рубашки.

Исследован характер разрушения термоупрочненных сердечников пуль Б32 при их взаимодействии с керамическими бронезащитными элементами разных толщин. Показано изменение характера фрагментации сердечников в зависимости от толщины бронезащитного элемента.

Предложены механизмы разрушения сердечников, учитывающие волновые процессы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Гриневич А.В., Петрова А.П. Соединение разнородных материалов для деталей, подверженных импульсным нагрузкам // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №10. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.03.2015).
3. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под. общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
4. Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Маринин В.М., Чистяков Е.Н. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования. М.: РадиоСофт, 2008. 406 с.
5. Защита танков / под ред. В.А. Григоряна. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 327 с.
6. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
7. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сенник В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 14–16.
8. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследование прочности авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 440–448.
9. Гриневич А.В., Ярош В.В. Дробящий эффект керамического слоя комбинированной брони // *Вопросы оборонной техники*. Сер. 15. 1999. Вып. 1–2. С. 20–30.
10. Григорян В.А. и др. Частные вопросы конечной баллистики. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 586 с.
11. Zook J.A., Frank K., Silsby G.F. Memorandum report BRL-MR-3960. Terminal ballistics test and analysis guidelines for the penetration mechanics branch. 1992. 127 с.
12. Rosenberg Z., Dekel E. Terminal Ballistics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2012. 323 с.
13. Backman M.E. Terminal Ballistics. Naval Weapons Center China Lake. California. 1976. 232 с.
14. Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. М.: Изд-во лит. по строительству. 1995. 448 с.
15. Landkof B., Goldsmit W. Petalling of Thin, Metallic Plates during Penetration by Cylindro-Conical Projectiles. AD-A 157 158. University of California. Int. J. Solids Structures. 1985. V. 21. №3. P. 245–266.
16. Балаганский И.А., Мержиевский Л.А. Действие средств поражения и боеприпасов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 408 с.
17. Александров Е.В., Соколинский В.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. М.: Наука, 1969. 201 с.