

УДК 620.1:666.7

А.В. Гриневич¹, А.В. Лавров¹**ОЦЕНКА БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-95-102

Анализируются критерии оценки баллистической стойкости керамических материалов. Показано, что физико-механические характеристики керамики, получаемые при статических испытаниях, позволяют оценивать баллистические характеристики керамики только на качественном уровне, в связи с чем необходима разработка специальных методик испытаний, обеспечивающих оценку работоспособности керамики при высоких скоростях ее взаимодействия с ударником. Описана методика прямой оценки баллистических характеристик керамики с использованием уловителя с дискретными экранами. Приведены результаты сравнительной оценки баллистических характеристик опытных партий бронекерамики на основе оксида алюминия и карбида кремния. Показано близкое соответствие результатов прямых баллистических испытаний и расчетов на основе модели присоединенной массы.

Ключевые слова: баллистические характеристики, керамика, ударные испытания.

A.V. Grinevich¹, A.V. Lavrov¹**THE ESTIMATION OF BALLISTIC PROPERTIES
OF CERAMIC MATERIALS**

The article analyzes the criteria for estimating the ballistic durability of ceramic materials. It is shown that the physicomachanical characteristics of ceramics obtained during static tests make it possible to assess the ballistic characteristics of ceramics only at a qualitative level, and therefore it is necessary to develop special test methods that ensure the ceramics work efficiency at high rates of its interaction with the impactor. A technique for direct estimation of the ballistic characteristics of ceramics using a trap with discrete screens is described. The results of a comparative evaluation of the ballistic characteristics of experimental batches of armored ceramics based on aluminum oxide and silicon carbide are presented. A close correspondence of the results of direct ballistic tests and calculations on the basis of the attached mass model is shown.

Keywords: ballistic characteristics, ceramics, shock tests.

¹Федеральное 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

В настоящее время разработка керамических материалов, обладающих комплексом высоких физико-механических свойств, является перспективным направлением материаловедения [1–5]. Одной из областей применения керамических материалов являются системы бронезащиты военной техники и средства индивидуальной бронезащиты личного состава вооруженных сил и сотрудников правоохранительных структур. Проблема применения керамических материалов в средствах бронезащиты детально

представлена в ряде научно-технических и рекламных публикаций [6–11]. Впервые бронезащита на основе керамических элементов, разработанная американскими учеными, была применена во время войны во Вьетнаме. Снижение массы керамической баллистической защиты в 2 раза по сравнению с традиционной броней на основе стали является беспрецедентным случаем в истории развития брони.

Достигнутый скачок по пулестойкости керамической брони, позволивший рекордно уменьшить массу противопульной защиты, заставил по-новому взглянуть на керамику, не являющуюся конструкционным материалом. Проблема живучести баллистической системы с применением керамических элементов решена за счет использования подложки, обеспечивающей конструкционную целостность и воспринимающей поток осколков разрушенной керамики и поражающего элемента. Поскольку баллистическая преграда в составе керамики и подложки рассматривалась как одно целое, то баллистическая оценка непосредственно керамики фактически отсутствовала.

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].

Материалы и методы

Для разработчиков керамических материалов, равно как и конструкционных материалов, необходимо знание основных характеристик материала, определяющих его работоспособность [12–14]. Создателю керамического материала необходимо из набора основных параметров работоспособности материала (модуль упругости, прочностные характеристики, плотность, ударная вязкость, твердость, пластичность, трещиностойкость) выделить определяющие свойства, улучшение которых обеспечит повышение баллистической стойкости. Прочностные характеристики, оцениваемые при различных способах приложения нагрузки (растяжение, изгиб, сжатие) и в различном напряженно-деформированном состоянии материала, должны определяться для условий, соответствующих взаимодействию преграды и ударника. Поскольку в стандартных лабораторных условиях крайне сложно воспроизвести нагружение материала, имитирующее локальное высокоскоростное воздействие, то единственным способом оценки являются прямые полигонные испытания.

Огромный экспериментальный материал, полученный при прямых полигонных испытаниях комбинированной баллистической системы на базе керамических материалов, позволил сформулировать требуемые показатели качества баллистической керамики. Эти показатели нашли отражение в формуле Стиглица:

$$G = E \cdot H_k / \rho, \quad (1)$$

где E – модуль упругости, ГПа; H_k – твердость по Кнупу; ρ – плотность керамики, кг/м³ [15, 16].

Примечателен факт отсутствия в формуле (1) прочностных характеристик керамического баллистического материала.

Некоторые исследователи в критерий пулестойкости керамики ввели критический коэффициент интенсивности напряжений. Данный критерий пулестойкости, упоминаемый в работах [7, 11], представлен в виде:

$$\Phi = 0,36 \cdot HV \cdot E \cdot c / K_{Ic}^2, \quad (2)$$

где HV – твердость по Виккерсу; c – скорость распространения продольных упругих волн, м/с; E – модуль упругости, ГПа; K_{Ic} – критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа $\sqrt{м}$.

Данный критерий противоречит физике процесса. Вязкость разрушения, представленная коэффициентом интенсивности напряжений K_{Ic} , определяет работу, затрачиваемую на развитие разрушения, и, исходя из этого, показатель K_{Ic} должен находиться в числителе. Ошибка в данном случае происходит из предположения о том, что противоположная стойкость керамики определяется суммарной энергией, затраченной на образование поверхностей разрушения, которая тем выше, чем меньше характерный размер фрагментов разрушенной керамики. Поскольку характерный размер фрагмента, как указывают авторы работы [11], пропорционален K_{Ic}^2 , то коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} оказывается в знаменателе формулы (2). Действительно, снижение коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} приведет к большей фрагментации керамического материала, но это не означает повышение его баллистической стойкости.

Исключив из анализа зависимость (2) с параметром механики разрушения, рассмотрим практическую ценность формулы Стиглица. Оценка параметра G , полученная в работе [16] для наиболее широко применяемых в баллистической защите материалов, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Оценка параметра G основных баллистических материалов [16]

Керамический материал	Плотность, кг/м ³	Параметр G	$G/G_{Al_2O_3}$
Горячеспеченный Al_2O_3	3800–3900	1,8–1,9	0,95–1
Реакционнospеченный SiC	3120	2,8	1,47
Горячепрессованный B_4C	2500	5,4	2,84

Исходя из данных табл. 1, горячепрессованный карбид бора имеет почти трехкратное преимущество по баллистическим показателям по сравнению с оксидом алюминия. Логично предположить, что данное преимущество и есть выигрыш в массовых характеристиках керамической преграды.

Однако прямые баллистические оценки керамических преград показывают, что полученный выигрыш по массе не соответствует теоретической формуле Стиглица. Ранее в работе [17] при анализе разрушения баллистической керамики показан конусообразный характер разрушения, что позволяет рассматривать данный конус как условную присоединенную массу. Модель, базирующаяся на присоединенной массе, устанавливает, что выигрыш по массе керамической преграды может быть оценен следующим соотношением:

$$M_x = M_{B_4C} \cdot (\rho_x / \rho_{B_4C})^{0,67}, \quad (3)$$

где M_x и ρ_x – поверхностная масса (кг/м²) и плотность (кг/м³) оцениваемой керамики; M_{B_4C} и ρ_{B_4C} – поверхностная масса и плотность горячепрессованного карбида бора.

Оценка по данной модели, отражающей реальный процесс разрушения керамической пластины, приводит к существенно меньшему выигрышу поверхностной массы карбида бора по сравнению с керамикой более высокой плотности. Так, применение оксида алюминия вместо карбида бора приводит к увеличению поверхностной массы в 1,37 раза. Экспериментальные данные подтверждают достоверность данной формулы. Основным постулатом применимости данной закономерности является достижение материалом его теоретической плотности (нулевой пористости).

Сравнение керамических материалов и установление преимущества одного материала по сравнению с другим на основании теоретических подходов крайне

затруднительно, учитывая многофакторность процесса взаимодействия керамики и средства поражения. Исходя из этого, наиболее достоверное ранжирование материалов по баллистической стойкости возможно только по результатам прямого баллистического эксперимента. На начальном этапе разработки баллистической керамики показано, что эффективность керамической преграды обусловлена тремя эффектами: дробящим, кинетическим и диссипативным [17]. Оценка этих эффектов по отдельности или интегрально дает возможность установить преимущества одного керамического материала по сравнению с другим.

Данный подход не является оригинальным, поскольку всегда разработчики баллистических материалов интересовались воздействием разработанной брони на средства поражения. Одну из первых работ в этом направлении следует отнести к 1940-м годам, но оригинальность, с которой она была выполнена, вызывает восхищение и сейчас. Н.М. Скляр (разработчик брони для легендарного штурмовика Ил-2) предложил набить пустую бочку снегом и расположить ее за баллистической преградой. После серии выстрелов снег растапливали, воду сливали, и экспериментаторы получали чистые деформированные или разрушенные сердечники исследуемых боеприпасов. Все последующие попытки получить фрагменты разрушенной пули (стрельба в песок с последующим просеиванием, улавливание фрагментов толстым алюминиевым экраном или путанкой из арамидных волокон) были более трудоемки и менее эффективны. При этом данные варианты экспериментов по улавливанию осколков пули дают ответ на вопрос о деформации и разрушении баллистической преградой высокоскоростного индентора, но не отвечают на вопрос об энергоемкости этих осколков или их поражающем воздействии.

Для баллистической оценки керамических материалов разработана специальная схема испытаний. При баллистических испытаниях исходят из требований как оценки каждого из эффектов, определяющих баллистические характеристики керамики (дробящего, кинетического, диссипативного) в отдельности, так и определения интегральной работоспособности керамики.

Реализация всех этих требований осуществлена на основе уловителя с дискретными экранами [17]. Конструкция приспособления для улавливания фрагментов разрушенного высокоскоростного индентора и керамической преграды включала ряд металлических экранов, расположенных на определенном расстоянии один от другого. Керамический элемент может либо жестко опираться на рамку приспособления, либо – с использованием демфирующих прокладок, или находится в подвешенном состоянии, чтобы избежать влияния заделки, или закрепляться на тонкой подложке, опирающейся на рамку приспособления и не влияющей на характер разрушения керамики. При этом регламентируется расстояние между керамическим элементом и первым экраном уловителя. Кроме того, для различных комбинаций преград и инденторов имеется возможность варьирования расстояния между экранами и использования экранов различной толщины.

Для испытаний, в которых в качестве индентора использовали бронебойную пулю типа Б32 калибра 7,62 мм, применяли экраны толщиной 2 мм, изготовленные из пластичного алюминиевого сплава. Керамические элементы приклеивали непосредственно к листу алюминиевого сплава толщиной 2 мм. Данный вариант крепления керамического элемента позволял определить точку попадания пули в образец и отсеять некондиционные поражения, возникающие при попадании в край образца. Попадание в край образца на расстоянии менее калибра средства поражения искажает результаты испытаний керамики, и поэтому считается некондиционным.

Результаты и обсуждение

В качестве объекта испытаний использовали пластины из оксида алюминия размером $(80-100) \times (80-100) \times (4-12)$ мм и карбида кремния размером $100 \times 100 \times (12-14)$ мм. Пластины оксида алюминия изготавливали на базе материала марки ГБ-7 с различной системой легирующих добавок. Разработчики алюмооксидной керамики экспериментировали как с исходными компонентами, так и технологическими режимами, которые характеризовались повышенными температурами спекания. Технология получения реакционноспеченного карбида кремния (SiC) включала создание пористого каркаса пластины из графита с последующей пропиткой его жидким кремнием. Физико-механические характеристики керамических пластин представлены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства керамических пластин

Материал	Плотность, кг/м ³	Прочность при изгибе, МПа	Микротвердость HV	Модуль упругости, ГПа
Al ₂ O ₃	3840–3880	340–360	1640–1890	360–390
SiC	3100	290–340	947–8120	390–410

Крайне большой разброс значений микротвердости (HV) для пластин карбида кремния обусловлен наличием фазы металлического кремния, поэтому минимальные значения микротвердости присущи участкам кремния, а максимальные – карбидным участкам.

Баллистическую оценку керамических пластин проводили при ударе пульей Б32 по нормали со скоростью соударения 850 м/с. Для анализа баллистических характеристик рассматривали соударения с отклонением по ударной скорости в диапазоне 845–855 м/с.

В качестве интегральной оценки баллистической характеристики керамики может быть принята суммарная толщина перфорированных экранов или их количество.

Результаты баллистических испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3

Суммарная поверхностная масса пробитых экранов

Материал	Толщина пластин, мм	Поверхностная масса пластин, кг/м ²	Количество пробитых экранов, шт.	Суммарная толщина пробитых экранов, мм	Суммарная поверхностная масса пробитых экранов, кг/м ²
Al ₂ O ₃	4,1	15,9	13	23,4	60,8
	6,2	24,0	9	16,2	42,1
	8,2	31,7	7	12,6	32,8
Al ₂ O ₃ +TiO ₂	8,2	31,9	9	16,2	42,1
Al ₂ O ₃	10,1	39,1	5	9	23,4
	12,2	47,2	2	3,6	9,36
SiC	10,0	31,0	6	10,8	28,1
	12,3	38,1	4	7,2	18,7
	17,6	54,6	0 (2 экрана смяты)	0	0

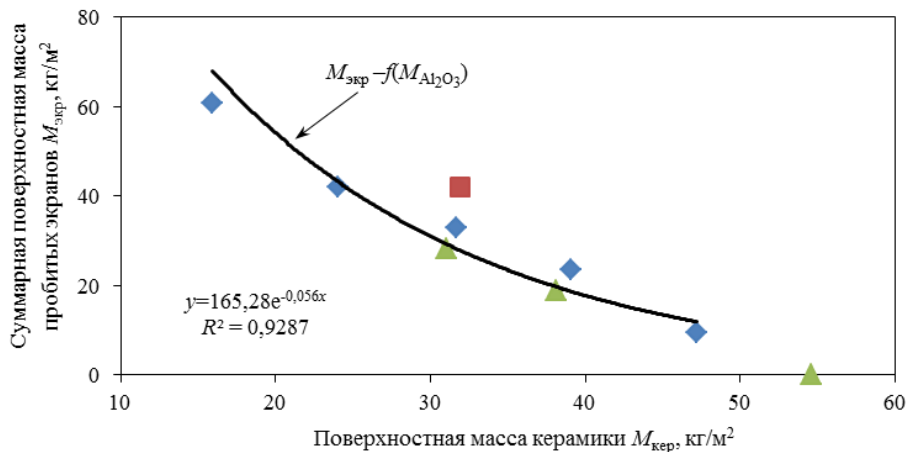
Для пластин оксида алюминия, механические характеристики которых соответствовали данным в табл. 2, баллистические характеристики, оцениваемые по средним значениям поверхностной массы, оказались практически идентичными. Определение

баллистических характеристик проводили при контроле угла соударения (± 1 град), скорости соударения (± 5 м/с) с дистанции более 20 м, обеспечивающей минимизацию угла расхождения между вектором скорости и осью пули. Скорость замеряли в каждом выстреле. Количество определений для пластин из оксида алюминия одной поверхностной массы было не менее пяти, а для пластин из карбида кремния ограничивалось тремя испытаниями. Разброс для каждого уровня испытаний находился в пределах двух экранов, что обусловлено различной степенью разрушения сердечника и кинематикой движения его наиболее массивной части. Незначительный разброс, полученный при баллистических испытаниях оксида алюминия, позволил объединить результаты испытаний, представив их некоторой зависимостью от поверхностной массы оксидной керамической преграды. Существенное снижение значений имело место для оксида алюминия, легированного оксидом титана. При замере твердости осколков испытанных образцов обнаружены зоны с пониженной твердостью $HV=830-980$. Однако данный факт, по-видимому, не может в полной мере объяснить резкое снижение баллистической стойкости, поскольку аналогичное локальное снижение твердости имеет место и для карбида кремния.

Карбид кремния при значительном разбросе по твердости показал стабильные результаты, что обусловлено относительно низким содержанием свободного кремния ($Si < 10\%$) и относительно равномерным его распределением.

Анализ результатов баллистических испытаний показал, что стандартные физико-механические характеристики не могут в полной мере определять баллистическую стойкость керамических материалов. При достаточно близких механических характеристиках баллистическое качество керамики может существенно отличаться.

Баллистическая стойкость пластин из карбида кремния с поверхностной массой ~ 40 кг/м² практически близка к обобщающей кривой ($M_{\text{экp}} = f(M_{\text{Al}_2\text{O}_3})$) для материала на основе оксида алюминия (см. рисунок). Если сравнить конкретную баллистическую стойкость, полученную при данных испытаниях карбида кремния и оксида алюминия, то суммарные поверхностные массы экранов будут соотноситься как 1,25, что ближе к оценке 1,21 по формуле присоединенной массы (3), нежели к коэффициенту 1,47, получаемому по формуле Стиглица (1).



Зависимость поверхностной массы пробитых экранов уловителя от поверхностной плотности керамических пластин из Al_2O_3 (◆), $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ (■) и SiC (▲)

Выполненные эксперименты показали, что при оценке баллистических характеристик керамики необходимо опираться на прямые баллистические испытания, выявляющие деформационные и силовые особенности поведения реального материала в экстремальных условиях скоростного соударения.

При использовании данной схемы испытаний следует учитывать, что она позволяет ранжировать керамические материалы в рамках принятых условий испытаний, заданных толщинами экранов и их разнесением.

Заключения

Установлено, что расчет баллистических характеристик керамических материалов, базирующийся на их стандартных физико-механических характеристиках, определяемых при статических испытаниях, не позволяет дать достоверную количественную оценку баллистической стойкости керамики и установить реальное преимущество одного материала по отношению к другому.

Разработана методика испытаний керамического материала, базирующаяся на использовании уловителя осколков керамики и индентора в ряде экранов с нормируемой толщиной и межэкранном расстоянием.

Применение предлагаемой схемы испытаний позволяет объективно оценить баллистическую стойкость керамического материала и обеспечить сравнение по данному параметру различных керамических материалов.

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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Сорокин О.Ю., Гращенков Д.В., Солнцев С.Ст., Евдокимов С.А. Керамические композиционные материалы с высокой окислительной стойкостью для перспективных летательных аппаратов (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №6. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.10.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-8-8.
3. Евтеев А.А. Некоторые аспекты разработки оптимальных режимов обжига керамических композиций, содержащих эвтектические добавки // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №2. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.10.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-12-12.
4. Ивахненко Ю.А., Варрик Н.М., Максимов В.Г. Высокотемпературные радиопрозрачные керамические композиционные материалы для обтекателей антенн и других изделий авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №5. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.10.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-5-5.
5. Бабашов В.Г., Ивахненко Ю.А., Юдин А.В., Зимичев А.М. Керамический материал для деталей установок непрерывной разливки цветных сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №12. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.10.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-5-5.
6. Марков В.Н. Новосибирская бронекерамика: прочность, признанная за рубежом // Оружие России: информационное агентство [Электронный ресурс]. URL: <http://www.arms-expo.ru>. (дата обращения: 16.10.2017).
7. Зайцев Г.П. Корундовая бронекерамика: опыт производства и применения // Экспертный союз. 2012. №3. URL: <http://unionexpert.ru/index.php/2011-07-25-5-56-33/item/287> (дата обращения: 16.10.2017).
8. Rosenberg Z., Dekel E. Terminal Ballistics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. 306 p.
9. Защита танков / под ред. В.А. Григоряна. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 327 с.

10. Григорян В.А. и др. Частные вопросы конечной баллистики. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 586 с.
11. 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.
12. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
13. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.S., Sevastyanov V.G. Glass and ceramics based high-temperature composite materials for use in aviation technology // Glass and Ceramics. 2012. Vol. 69. No. 3–4. P. 109–112.
14. Гаршин А.П., Гропянов В.М., Зайцев Г.П., Семенов С.С. Керамика для машиностроения. М.: Научтехлитиздат, 2003. 384 с.
15. Кременчугский М.В., Савкин Г.Г., Малинов В.И. и др. Разработка противопульной брони с применением керамических материалов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ, №9. 2005. С. 302–309.
16. Гриневич А.В., Ярош В.В. Особенности разрушения керамики при ударном воздействии // Вопросы оборонной техники. Сер.: 15. 1999. Вып. 1–2. С. 23–30.
17. Ерасов В.С., Лавров А.В., Луценко А.Н., Гриневич А.В. К вопросу взаимодействия термоупрочненного ударника с керамической преградой // Авиационные материалы и технологии. 2016. №2. С. 69–75. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-69-75.