

УДК 623.094

А.М. Игнатова

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

Н.М. Сильников

НПО «Специальные материалы», Санкт-Петербург, Россия

ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Изложен обзор практических принципов в оценке баллистических характеристик неметаллических материалов по показателям механических и физических свойств, представлены принципы оценки баллистических свойств изделий из неметаллических материалов. Описаны методики оценки баллистических свойств с помощью показателя плотности и уплотненности, а также по модулю Юнга, модулю сдвига и модулю всестороннего сжатия. Представлены методики, основанные на определении предела упругости Гюгонио, полубесконечный тест на пробитие, испытание на глубину пробития, испытание на остановку ударника, комбинированные испытания на пробитие и остановку, метод фиксирования геометрии мишени, метод тандемного принципа и определение баллистического предела. Представленные методики отличаются разнообразием, в отличие от методик по определению классу пулестойкости, однако среди них нет ни одной выделенной в качестве стандартной, что затрудняет оценку близких по свойствам материалов. Авторы также представляют редкий вид испытаний для сравнительной оценки баллистических свойств с помощью анализа фрагментации мишени после ее поражения ударником. Приведены данные проведенного фрагментационного анализа для образцов синтетических минеральных сплавов, разрушенных высокоскоростным ударом, произведенным с помощью рельсотрона.

Ключевые слова: индивидуальная бронезащита, баллистический предел, пулестойкость, оценка пулестойкости, пробитие, бронирование, предел Гюгонио, рельсотрон, фрагментация, кумулятивные кривые.

A.M. Ignatova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

N.M. Silnikov

Special Materials Corp., Saint-Petersburg, Russian Federation

PRINCIPLE AND METHODS OF EVALUATION OF BALLISTIC PROPERTIES NON-METAL MATERIALS AND PRODUCTS

The article describes an overview of the practical principles in assessing the ballistic characteristics of non-metallic materials in terms of mechanical and physical properties are presented and principles of assessment of ballistic properties of the articles made of nonmetallic materials. Presents the methodology for assessing the ballistic properties of the density and compaction, as well as Young's modulus, shear modulus and compression modulus. Techniques based on the determination of the Hugoniot elastic limit, a semi-infinite penetration test, the test of the depth of penetration test, the firing pin stop, combined test penetration and stopping, the method of fixing the target geometry, the tandem method principles and definitions of the ballistic limit. The presented techniques are varied, unlike the methods for determining the class of bullet resistance, however, among them there is no dedicated as standard, making it difficult to assess the materials with similar properties. The authors also represent a rare kind of test for the comparative evaluation of ballistic properties by analyzing the target fragmentation after its defeat drummer. The data of fragmentation analyzes conducted for samples of synthetic mineral alloys destroyed high-velocity impact produced by a railgun.

Keywords: personal body armor, ballistic limit, bullet protection, evaluation of bullet resistant, penetration, reservation, limit Hugoniot, railgun, fragmentation, cumulative curves.

Керамические и неметаллические оксидные материалы широко используются в качестве элементов индивидуальной бронезащиты благодаря сочетанию хороших баллистических характеристик и низкой плотности [1]. Потенциал использования неметаллических материалов в качестве бронезащиты велик, а потому данная индустрия активно развивается, появляются новые наноструктурированные, композитные и прочие разновидности материалов [2]. Наравне с интенсивным развитием данной отрасли растет потребность в методиках, позволяющих прогнозировать баллистические свойства новых материалов, устанавливать связи между структурными, физико-химическими характеристиками и баллистическими характеристиками, а также проводить подробное качественное сравнение материалов, чьи баллистические характеристики достаточно близки. Единых методик, позволяющих получать такие результаты, в настоящее время не сформулировано, тем не менее в иностранной и отечественной литературе представлен опыт отдельных исследователей [3].

Цель обзора – представить наиболее современные взгляды на практику оценки баллистических характеристик неметаллических материалов и методики их оценки.

Обширные исследования [4] в области керамических, спеченных и других типов неметаллических материалов указывают на то, что их важнейшие механические свойства, такие как прочность при растяжении и сжатии, твердость и износостойкость, зависят от характеристик микроструктуры, в значительной степени – от размера и формы структурных составляющих [5], это утверждение справедливо для статических нагрузок. Опираясь на установленные зависимости для статических нагрузок, исследователи [6] пытались выявить связь между механическими характеристиками материалов и их баллистическими характеристиками и прогнозировать их таким образом. Однако в более современных работах [4–7] исследователи настаивают на том, что реакция материала на высокоскоростные ударные нагрузки при баллистическом воздействии имеет иной механизм, чем при статических нагрузках, и оценить баллистические характеристики, оперируя исключительно данными о поведении материала при статических нагрузках, невозможно, в особенности когда речь идет о сравнительной характеристике двух похожих по свойствам материалов.

Тем не менее некоторые зависимости между механическими свойствами неметаллических материалов и их способностью сопротивляться пробитию позволяют оценить потенциал материала к использованию в качестве бронезащиты [7].

В первую очередь, разумеется, следует рассмотреть *твердость*, ведь именно она характеризует способность материала сопротивляться внедрению в него инородного тела. В тех случаях, когда твердость материала выше твердости снаряда, в момент столкновения возникает ситуация, когда преграда на доли секунды останавливает снаряд. Как отмечается в работах [8], в результате такой остановки снаряд деформируется таким образом, что его наконечник сплющивается или разрушается. Это приводит к изменению характеристик удара, а значит, и защитные функции материала повышаются.

В работах [9] указывается, что и *прочность на сжатие*, в тех случаях, когда она выше, чем у ударника, может способствовать деформации и разрушению последнего. Однако в тех же работах [10] указывается, что это справедливо лишь в тех случаях, когда длина ударника

достаточно мала. Кроме того, из-за локализации удара возникает контрастный градиент напряжений [11] (в зоне удара – сжимающие, а во всех направлениях вокруг этой зоны – растягивающие), в результате напряжения начинают работать на сдвиг, а, как правило, неметаллические материалы, используемые в бронезащите, не обладают хорошей стойкостью к подобного рода нагрузкам, поэтому эффективность защиты снижается [12].

Еще одной важной характеристикой неметаллических бронезащитных материалов является *плотность* [13], причем не только плотность самого материала, но и так называемая *уплотненность*, т.е. отсутствие пористости. Именно пористость зачастую приводит к неудовлетворительным результатам испытаний подобного рода материалов [14].

Учитывая опыт многих предшественников, исследователи [10] указывают, что характеристиками, позволяющими судить о баллистических свойствах материала, являются *модуль Юнга, модуль сдвига и модуль всестороннего сжатия*. Чем выше эти характеристики, тем лучше должны быть баллистические свойства. Данное утверждение основывается на том, что судить о диссипативной способности, а значит, и о баллистической эффективности материала можно по показателю скорости звука в материале [15]: чем выше скорость звука в материале, тем ниже его пористость и выше уплотненность, а значит, чем выше значение модуля Юнга, тем лучше будет этот показатель:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где C – скорость звука в материале; E – модуль Юнга; ρ – плотность.

С учетом локализации воздействия при баллистическом ударе важной характеристикой является *предел упругости Гюгонио* [16], который определяется как предел текучести при одноосном динамическом нагружении. Это важный показатель, потому что в момент удара в точке его локализации величина давления настолько высока, что может превысить этот предел, а материал, испытывающий нагрузки выше предела упругости Гюгонио, может не проявлять текучести, и в результате баллистическая эффективность защиты снижается.

В отличие от предшествующих характеристик, влияние *трещиностойкости* материала на его баллистические свойства не имеет однозначного характера. Например, некоторые материалы, обладающие

хорошей трещиностойкостью, вопреки ожиданиям дают плохие результаты при баллистических испытаниях. В работах [4–9] это объясняют тем, что, как правило, высокой трещиностойкостью обладают материалы с разнородными фазами, которые при динамическом нагружении начинают разрушаться одновременно, а не последовательно. В то же время материалы на основе карбида кремния с пропиткой алюминием [12], несмотря на разнородность составляющих, обеспечивают высокую степень защиты и обеспечивают стойкость материала в условиях нескольких ударов. В идеале необходим баланс между твердостью и трещиностойкостью отдельных составляющих.

Методы экспериментальной оценки баллистических характеристик можно разделить на две категории: методы оценки баллистических характеристик материала и методы оценки баллистических характеристик изделий. Методики по оценке свойств материала разнообразны, однако можно выделить несколько общепринятых и устоявшихся.

Полубесконечный тест на пробитие подразумевает построение графических зависимостей пробиваемости от скорости удара. Полученные модели позволяют получить представление о скорости эрозии ударника и сопротивлении керамики к пробитию [13].

Испытание на глубину пробития – методика, которая была предложена в 1980-х гг. для рейтинговой оценки керамических материалов, используемых в бронезащите. Данные таких испытаний активно использовались для определения баллистической эффективности. На рисунке представлена схема, иллюстрирующая принцип метода.

В качестве мишени используется конструкция, передняя часть которой представляет собой пластину испытываемого неметаллического материала заданной толщины, а задняя – лист бронестали, толщина которого в 3–4 раза превышает толщину пластины испытываемого материала (некоторые исследователи вместо стали используют алюминиевые пластины). Смысл испытания заключается в том, что ударник после столкновения и пробития керамической пластины может продолжить свое движение, проникая в подкладочный слой мишени. Глубина, на которую проникает ударник после столкновения с испытываемой пластиной, и есть оценочный параметр. Этот параметр является количественным и используется только для сравнительной оценки в одинаковых условиях (рисунок).

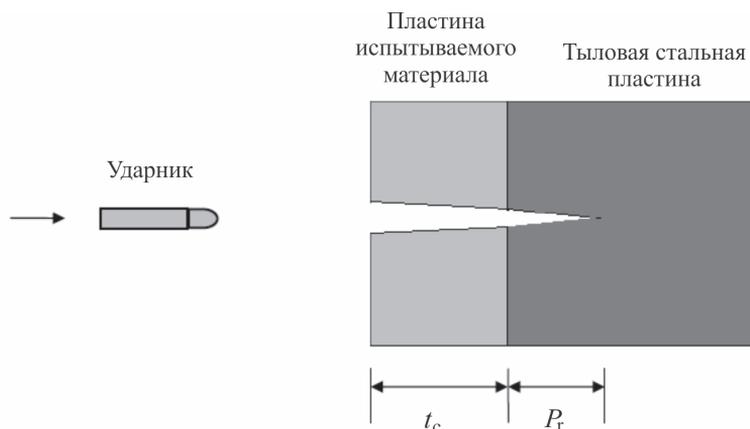


Рис. Испытание на глубину пробития

Остаточное пробитие в толще задней пластины рассчитывается как функция скорости удара и толщины керамической пластины. С развитием метода исследователи предложили обрабатывать результаты исследований по формуле:

$$\eta = \frac{\rho_b (P_b - P_r)}{\rho_b t_c},$$

где ρ_b , ρ_c – плотность задней и керамической пластины соответственно; t_c – толщина испытываемой пластины; P_b – глубина пробития задней пластины без керамического слоя; P_r – остаточная глубина пробития задней пластины с керамическим слоем.

Поскольку толщина пластины t_c находится в знаменателе, то данная формула характеризует эффективность в зависимости от толщины испытываемого материала. Этот параметр также называют дифференциальным фактором эффективности. Анализ результатов многочисленных испытаний позволил выявить возрастающую линейную зависимость между эффективностью защиты и толщиной пластины, однако данная зависимость является небесконечной, и при определенном значении максимальной толщины дальнейшее ее увеличение не имеет влияния на эффективность. Данный метод весьма популярен, несмотря на то что его результаты зачастую не дают представления о поведении брони в реальных условиях.

Испытание на остановку ударника – впервые такой эксперимент подробно описан в работах [5–12], тогда было установлено, что когда

ударник поражает жестко и всесторонне закрепленную мишень из неметаллического материала, он останавливается на поверхности мишени. В течение первых 10 мс после удара наблюдается радиальный рост деформационных явлений ударника (смятие, разрывы и т.д.) в направлении под углом 90° к оси пробития. Это явление и называется остановкой. В настоящее время считается, что подобная остановка присутствует во всех экспериментах, и данная теория должна быть использована при любых баллистических испытаниях. Согласно этой методике неметаллический материал будет сопротивляться пробитию, пока по каким-то причинам баланс не сместится и пробитие не произойдет. В тех экспериментах, когда эрозия ударника происходит без пробития, скорость удара является относительно невысокой.

Комбинированные испытания на пробитие и остановку [12, 14] стали применяться в связи с тем, что скорость снарядов приобретала критические значения. Поверхностные напряжения, создаваемые ударником при движении на критической скорости, превышают предел прочности на сжатие, поэтому задержка ударника на его поверхности длится недолго, и это не предотвращает пробитие. Комбинированные испытания как раз позволяют выявить величину критической скорости, при которой пробитие произойдет неизбежно, даже если реализуется остановка. Именно с помощью данной методики были получены величины критических скоростей пробития для наиболее современных бронематериалов при пробитии их вольфрамовыми ударниками.

Значения критических скоростей пробития для различных видов бронематериалов вольфрамовыми ударниками цилиндрической формы длиной 50 мм и диаметром 7 мм:

Материал	Величина критической скорости, м/с
SiC-1	1645–1705
SiC-2	1615–1715
TiB2	1465–1545
B4C	1430–1480

Методы по оценке баллистических характеристик изделий представляют собой синтез предшествующих методик и принципов формирования бронеизделий. Суть подходов к оценке остается той же, а принципы создания мишеней и выбор пробников приближаются к реальным условиям.

Один из методов такого рода – метод *фиксирования геометрии мишени*. Этот метод используется для рейтинговой оценки баллистических свойств изделий в условиях, приближенных к реальным, и позволяет сделать вывод о рекомендуемой толщине прослойки неметаллического материала в изделии. Например, испытание по такому методу могут быть проведены по схеме 1–4–3, где 1 значит, что первый слой изделия представляет собой покровную металлическую пластину, толщина которой равна одной условной единице, 4 значит, что пластина неметаллического материала, находящаяся за покровной пластиной, имеет толщину в 4 условные единицы, а 3 означает, что тыловая металлическая пластина имеет толщину в 3 условные единицы.

Известен метод *тандемного принципа*. Поскольку в реальных условиях на поведение неметаллических элементов в качестве бронезащиты влияет множество факторов, использование пластин, толщина которых равна минимальной рекомендованной, не оправдывает ожиданий, в результате используются более толстые, а значит, более дорогие и менее эффективные пластины. В одной из армейских исследовательских лабораторий был разработан метод использования наборных мишеней, т.е. вместо одной пластины из неметаллического материала использовалось несколько пластин, суммарная толщина которых соответствовала рекомендованной толщине для монолитного элемента. В результате таких испытаний было установлено, что наборная мишень справляется с баллистической нагрузкой лучше, чем однослойная эквивалентной толщины. Подобные испытания позволяют установить рекомендованное число слоев в элементах и неметаллических материалах.

Испытания по *определению баллистического предела*. В качестве значения баллистического предела может быть принята величина максимальной скорости воздействия, при которой испытываемое изделие обеспечивает защиту, также за величину баллистического предела может быть взята величина геометрического параметра изделия, при которой оно выдерживает заданное воздействие (например, баллистический предел для материала X при скорости Y составляет толщина, равная Z , мм), в качестве ударника, как правило, используются пробойники, соответствующие по своим параметрам боеприпасам калибра 7,62×51 мм. Метод определения баллистического предела получил широкое распространение, в особенности для оценки сопротивления материала воздействию малого стрелкового оружия. В таких экс-

периментах баллистический предел определяется как скорость, при которой ударник имеет 50 % вероятности полностью пробить защиту. За баллистический предел принимается среднее значение скоростей, при которых пробитие и не пробитие является равновероятным. Этот метод подразумевает наличие как минимум пяти выстрелов, из которых два дают частичное пробитие и два – полное пробитие.

По методике количество выстрелов должно быть достаточно большим, чтобы сократить разброс данных, однако это удорожает испытания. Для ранжирования неметаллических материалов равного объема по уровню баллистической стойкости по методу определения баллистического предела (скорость) в зарубежных армейских лабораториях был принят единый стандарт для испытываемых элементов, согласно которому они представляют собой трехслойную структуру, где первый слой состоит из стали и имеет толщину 6,4 мм, второй – из неметаллического материала и имеет толщину 25,4 мм, и третий (тыловой) состоит, как и первый, из стали, но имеет толщину 19,1 мм. Для точного фиксирования скорости используют рентгеновское оборудование. Данный метод наиболее распространен у современных зарубежных исследователей.

При испытании изделий важной характеристикой также является оценка состояния ударника и тыловой пластины. Разрушившаяся тыловая пластина свидетельствует о неэффективности защиты, а ее прогиб измеряется и оценивается по отдельным методикам.

Кроме методов оценки баллистической эффективности материалов и изделий существуют методики косвенной оценки, через подсчет количества диссипируемой энергии или энергии, затраченной на разрушение мишени из неметаллического материала при баллистическом воздействии. Наиболее часто используются *методы оценки диссипации через фрагментацию мишени*. Все подобные методы подразумевают сбор фрагментов разрушения и измерение и интерпретацию их геометрических параметров. Например, метод составления кумулятивных функций распределения осколков по размеру [15] позволяет сравнивать два близких по характеристикам материала, а комбинация этого метода с подсчетом суммарной площади фрагментов разной размерной группы позволяет сделать эти результаты наглядными.

Данный метод предполагает сбор фрагментов разрушения мишени, сепарацию их на размерные группы посредством ситового анализа

и последующий подсчет количества элементов в каждой из групп. Этот метод требует построения кумулятивной функции распределения фрагментов по размерам, т.е. определения зависимости количества фрагментов $N(r, m)$ размером r (массой m) больше некоторого заданного от размера фрагмента r (массы m). Масса фрагментов определяется путем взвешивания на электронных весах (точность весов равна 10^{-4} г). Крупные фрагменты взвешиваются индивидуально, а мелкие фрагменты – в режиме «счета фрагментов», затем определяют массу и количество фрагментов в каждом сите. Взвешивается определенное количество фрагментов (10, 25, 50, 100). Затем высчитывается средняя площадь поверхности одного фрагмента в каждой группе, вычисляется суммарная площадь фрагментов каждой группы, а затем – суммарная площадь всех фрагментов. После этого высчитывается работа, затраченная на разрушение (фрагментацию):

$$W_f = GS/2,$$

где S – общая площадь поверхности фрагментов разрушения; G – скорость высвобождения энергии деформации:

$$G = K_{IC}^2 / E,$$

где K_{IC} – вязкость разрушения; E – модуль упругости.

Таким образом, представлен обзор существующих подходов к прогнозированию баллистических характеристик неметаллических материалов и методов по определению этих характеристик в рамках исследовательской работы. Представленные методики отличаются разнообразием, в отличие от методик по определению класса пулестойкости, однако среди них нет ни одной выделенной в качестве стандартной. Подробное качественное сравнение материалов, чьи баллистические характеристики достаточно близки, и их интерпретация в рамках научного исследования осложняется отсутствием регламентирующих правил, именно поэтому зачастую многие материалы оказываются недооцененными с точки зрения использования в бронезащите. Применение изложенных методик, их совершенствование и развитие позволит в будущем с большим успехом использовать экспериментальные данные баллистических испытаний в улучшении защитных функций неметаллических бронематериалов.

Работа отмечена грантом Президента РФ для молодых кандидатов наук МК-4399.2014.10.

Список литературы

1. Анастасиади Г.П., Сильников М.В. Работоспособность броневых материалов / НПО «Специальные материалы». – СПб., 2004. – 624 с.
2. Байдак В.И., Блинов О.Ф., Знахурко В.А. Концептуальные основы создания средств индивидуальной защиты. – М., 2003. – 340 с.
3. Байдак В.И., Маркелов Е.Б., Терехов И.С. Обоснование рациональной массы экипировки военнослужащего // Актуальные проблемы защиты и безопасности: тр. первой Всерос. науч.-практ. конф. – СПб., 1999. – С. 93–98.
4. Ивлиев Ю.Г., Чистяков Е.Н. Бронежилеты: как это было // Мастер-ружье. – 1999. – № 34/35. – С. 50–52.
5. Мошков Г.В., Есин Б.В. О некоторых аспектах выбора и применения бронежилетов // Форт Технология. – 1999. – № 5. – С. 4.
6. Кулаков И.В. Требования к индивидуальной бронезащите // Банковские технологии. – 1997. – № 7. – С. 97–100.
7. Сильников М.В., Байдак В.И. Состояние, перспективы развития и унификации носимого вооружения и боевой индивидуальной экипировки // Защита и безопасность. Общественно-правовой и научно-технический журнал. – 1998. – № 3 (6). – С. 7–9.
8. Microhardness and High-Velocity Impact Resistance of SiC and ZrB₂/SiC Composites / J. Marschall, D.C. Erlich, H. Manning, W. Duppler, D. Ellerby, M. Gasch // J. Mater. Sci. – 2004. – No. 39. – P. 5959–5968.
9. Guiberteau F., Padture N.P., Lawn B.R. Effect of Grain Size on Hertzian Contact Damage in Alumina // J. Am. Cerum. Soc. – 1994. – No. 77. – P. 1825–1831.
10. Jacobs M.J.N., Van Dingenen J.L.J. Ballistic protection mechanisms in personal armor // Journal of Materials Science. – 2001. – No. 36. – P. 3137–3142.
11. Игнатова А.М., Артемов А.О. Аналитический обзор современных и перспективных материалов и конструкций бронепреград и защит от поражения // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6–1. – С. 101–105.

12. Методика исследования диссипативных свойств синтетических минеральных сплавов при высокоскоростном пробивании / А.М. Игнатова, А.О. Артемов, М.Н. Игнатов, М.А. Соколов // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 9–1. – С. 145–150.

13. Исследование диссипативных свойств синтетических минеральных сплавов для создания на их основе броневой защиты / А.М. Игнатова, А.О. Артемов, В.В. Чудинов, М.Н. Игнатов, М.А. Соколов // *Вестник Самарского государственного технического университета*. Серия: Технические науки. – 2012. – № 3. – С. 105–112.

14. Исследование взаимосвязи акустической эмиссии и разрушения камнелитых материалов в условиях одноосного сжатия / М.Н. Игнатов, А.М. Игнатова, А.О. Артемов, В.А. Асанов // *Вестник Самарского государственного технического университета*. Серия: Технические науки. – 2011. – № 2. – С. 126–132.

15. Игнатова А.М., Артемов А.О., Игнатов М.Н. Противокумулятивная защита техники с применением синтетических минеральных сплавов // *Двойные технологии*. – 2014. – № 2 (67). – С. 13–17.

Получено 16.02.2015

Игнатова Анна Михайловна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института безопасности труда, производства и человека, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: iampstu@gmail.com.

Сильников Никита Михайлович (Санкт-Петербург, Россия) – технический директор, НПО «Специальные материалы», e-mail: silnikov.nikita@gmail.com.

Ignatova Anna (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of safety labor, manufacturing and human, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: iampstu@gmail.com.

Silnikov Nikita (Saint-Petersburg, Russian Federation) – Technical Director, Special Materials Corp., e-mail: silnikov.nikita@gmail.com.