

УДК 623.445+539.411.5

ПРОБИВАНИЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ПРЕГРАД С ВНЕШНИМ КЕРАМИЧЕСКИМ СЛОЕМ И ОПТИМИЗАЦИЯ ИХ СТРУКТУРЫ

И. Ф. Кобылкин

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва
kobylikin_iv@mail.ru

Получены аналитические формулы для расчета предельной скорости пробития двухслойных керамико-металлических и керамико-органопластиковых преград, учитывающие структурные характеристики преграды и физико-механические свойства материалов ударника и преграды. С помощью этих формул выполнено исследование баллистической стойкости преград и показана возможность оптимизации их структуры. Полученные результаты качественно согласуются с известными экспериментальными данными. В диапазоне поверхностной плотности преграды $30 \div 50 \text{ кг/м}^2$ для разных материалов подложки определена оптимальная относительная толщина керамического слоя, обеспечивающая максимальную предельную скорость пробития. Оказалось, что эти значения скорости слабо зависят от поверхностной плотности преграды и определяются, главным образом, свойствами материала подложки.

Ключевые слова: пробивание, двухслойные преграды, керамика, органопластик, предельная скорость пробития, оптимизация.

DOI 10.15372/FGV20170413

ВВЕДЕНИЕ

Двухслойные преграды, состоящие из внешнего керамического слоя и тыльной энергоемкой металлической или композитной органопластиковой подложки, являются весьма эффективными защитными структурами от действия бронебойных пуль, обладающих высокой проникающей способностью [1]. Высокая противопульная стойкость таких преград обеспечивается наличием керамики — высокотвердого, но очень хрупкого материала. Особенности пробивания керамических слоев преград, определяющими их высокую противопульную стойкость, являются задержка проникновения ударника в керамику и ее разрушение в области воздействия в форме усеченного конуса, обращенного большим основанием к подложке [1]. Угол раствора разрушенного керамического конуса изменяется в пределах $2\alpha = 100 \div 130^\circ$.

Однако сама керамическая преграда обладает невысокой противопульной стойкостью. Для проявления ее защитных свойств необходимы достаточно прочные металлические или органопластиковые энергоемкие подложки [1]. В настоящей статье представлена феноменоло-

гическая модель пробивания двухслойных преград, учитывающая деформирование и разрушение ударника, разрушение керамического конуса и деформирование подложки. На основании этой модели получены аналитические формулы для предельной скорости пробития двухслойной преграды, учитывающие ее структуру и физико-механические свойства материалов ударника и преграды. С использованием этих формул выполнено исследование баллистической стойкости преград и показана возможность оптимизации их структуры.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ПРОБИТИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ ПРЕГРАД

Обзор работ, в которых предлагались аналитические зависимости для расчета предельной скорости пробития двухслойных преград, приведен в книге [2]. Общим недостатком этих работ является то, что в них не учитываются важнейшие составляющие процесса пробивания преграды. Во-первых, не учитываются разрушение ударника и связанное с ним уменьшение кинетической энергии ударника. Во-вторых, недостаточно последовательно учитываются или вовсе не учитываются разрушение керамики и затраты на него кинетической

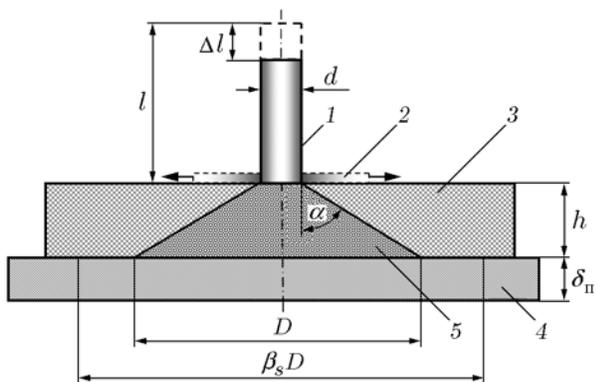


Рис. 1. Схема взаимодействия ударника с двухслойной преградой:

1 — ударник, 2 — разлетающаяся в радиальном направлении разрушенная часть ударника, 3 — керамический слой, 4 — подложка, 5 — разрушенный керамический конус

энергии ударника.

В настоящей статье предлагается модель, которая включает в себя процессы деформирования и разрушения ударника, разрушения керамического конуса и деформирования подложки. Геометрия взаимодействия ударника с преградой, соответствующая рассматриваемой модели, приведена на рис. 1. Основные положения модели состоят в следующем.

1. Вследствие высокой твердости керамики проникание в нее ударника происходит с временной задержкой t_p , в течение которой ударник разрушается (срабатывается) на керамическом слое, как на жесткой преграде, а в керамике формируется разрушенная коническая область.

2. После формирования разрушенного керамического конуса оставшаяся часть ударника, конус и часть подложки, расположенной под основанием конуса, движутся с одинаковой скоростью v_1 , определяемой из закона сохранения импульса.

Для сформулированной модели взаимодействия ударника с преградой запишем закон сохранения импульса, в котором, следуя [3], выделим в виде самостоятельного члена импульс I , передаваемый преграде в течение времени задержки проникания:

$$M_{уд}v_0 = (M_{уд1} + M_k + m_{п})v_1 + I,$$

где $M_{уд}$, v_0 — начальные масса и скорость ударника, $M_{уд1}$ — масса ударника после срабатывания в течение времени задержки проникания, M_k — масса керамического конуса, $m_{п}$ —

масса вовлеченной в движение деформируемой части подложки. Из этого уравнения следует соотношение для скорости

$$v_1 = \frac{M_{уд}v_0 - I}{M_{уд1} + M_k + m_{п}}. \quad (1)$$

Закон сохранения энергии в рассматриваемом процессе может быть записан в следующем виде:

$$\frac{M_{уд}v_0^2}{2} = \frac{(M_{уд1} + M_k + m_{п})v_1^2}{2} + \frac{(M_{уд} - M_{уд1})v_0^2}{2} + A_1 + A_2 + A_3.$$

Согласно этому закону в процессе взаимодействия с преградой кинетическая энергия ударника преобразуется в кинетическую энергию движущихся совместно оставшейся части ударника, керамического конуса и части подложки, на которую опирается конус (первый член в правой части); в кинетическую энергию разрушенной или сработавшей части ударника, разлетающейся в радиальном направлении (второй член в правой части); в работу разрушения ударника A_1 и керамики A_2 , а также в работу деформирования подложки A_3 .

В предельных условиях пробития преграды кинетическая энергия движущихся в осевом направлении оставшейся части ударника, керамического конуса и части подложки преобразуется в работу деформирования и разрушения подложки, на которую опирается разрушенный керамический конус:

$$\frac{(M_{уд1} + M_k + m_{п})v_1^2}{2} = A_3. \quad (2)$$

Поскольку смещения элементов преграды на стадии задержки проникания не происходит, будем считать, что импульс силы контактного давления частично передается преграде. Оценить импульс I , передаваемый преграде, можно путем оценки потерянной кинетической энергии ударника $\Delta E_{уд}$, затрачиваемой на совершение работы разрушения ударника A_1 и керамики A_2 , и последующего использования формул

$$\Delta E_{уд} = A_1 + A_2, \quad I = \sqrt{2M_{уд}\Delta E_{уд}}. \quad (3)$$

Работу деформирования и разрушения ударника оценим следующим образом. Пусть срабатывание ударника осуществляется при

некотором постоянном напряжении $\sigma_{уд}$, характеризующем динамический предел прочности на сжатие. Тогда работа его деформирования и разрушения будет равна

$$A_1 = \xi_{уд} \sigma_{уд} \varepsilon_{уд} \Delta V_{уд},$$

где $\xi_{уд}$ — коэффициент, учитывающий неоднородность деформации ударника, $\Delta V_{уд}$ — объем разрушившейся или сработавшейся части ударника, $\varepsilon_{уд}$ — предельная деформация материала ударника. Разрушившийся или сработавшийся объем ударника $\Delta V_{уд}$ приближенно можно определить с помощью соотношения

$$\Delta V_{уд} \approx \frac{\pi d^2 \Delta l}{4},$$

где Δl — укорочение ударника. Обычно Δl определяется экспериментально и используется для оценки времени задержки проникания с помощью соотношения $t_p = \Delta l/v_0$. Анализ экспериментальных данных, выполненный в [1, 4], показал, что укорочение бронебойных пуль Б-32 калибра 7.62 мм при взаимодействии с керамиками Al_2O_3 и SiC в широком диапазоне скоростей составляет $\Delta l = (1.2 \div 1.9)h$ [1, с. 139]. Ниже в формулах предполагается, что укорочение ударника пропорционально толщине керамического слоя с осредненным коэффициентом пропорциональности $n = 1.5$:

$$\Delta l = 1.5h.$$

Поскольку керамика является хрупким материалом, работу разрушения керамического конуса A_2 можно оценить по соотношению

$$A_2 \approx A_f = \frac{\xi_k \sigma_{сж}^2}{2E} V_k,$$

где $\sigma_{сж}$ — предел прочности керамики на сжатие, V_k — объем разрушенного керамического конуса, ξ_k — коэффициент, учитывающий неоднородность деформации керамики в разрушенном конусе.

С учетом соотношения (3) и приведенных выше выражений для A_1 и A_2 перепишем формулу (1) в виде

$$v_1 = \frac{M_{уд} v_0 - \sqrt{2M_{уд} \left(\xi_{уд} \sigma_{уд} \varepsilon_{уд} \Delta V_{уд} + \frac{\xi_k \sigma_{сж}^2}{2E} V_k \right)}}{M_{уд1} + M_k + m_{п}}. \quad (4)$$

Предельная работа пластического деформирования металлической подложки $A_{3м}$ может быть определена в приближении ее одномерного растяжения с учетом неравномерности деформаций:

$$A_{3м} \approx \xi_{п} \sigma_{п} \varepsilon_{п} V_d, \quad (5)$$

где $\sigma_{п}$, $\varepsilon_{п}$ — динамический предел текучести и предельная деформация материала металлической подложки, V_d — объем деформированной части подложки, $\xi_{п}$ — коэффициент, учитывающий неравномерность и динамический характер деформации части подложки, расположенной под выбиваемым керамическим конусом.

Двухслойные защитные структуры, состоящие из керамики и металлической подложки, широко используются для локальной защиты легкой бронетехники, а также для бронезащиты авиационной и автомобильной техники. Для индивидуальной бронезащиты, как правило, используются защитные структуры из керамики на композитной органопластиковой подложке [1, 5, 6]. Следуя [1], будем считать, что при относительно небольшом содержании связки баллистическая стойкость органопластиковой преграды определяется способностью ее текстильной основы преобразовывать кинетическую энергию ударника в упругую энергию растяжения нитей без их разрушения. Максимальная упругая энергия W_y , которая может быть запасена текстильной основой, равна упругой энергии деформированного объема подложки $V_{п}$ при достижении нитями деформации разрушения ε_p :

$$W_y = \frac{E_n \varepsilon_p^2}{2} V_{п},$$

где E_n — модуль упругости растяжения нитей. Поскольку кинетическая энергия деформированного объема подложки на пределе пробития близка к нулю, работа деформирования органопластиковой подложки $A_{3о-п}$ может быть принята равной W_y . При вычислении работы $A_{3о-п}$ следует учесть два обстоятельства. Во-первых, часть деформируемого объема подложки занята связующим, прочность которого мала по сравнению с прочностью высокомодульных сверхвысокопрочных параарамидных или полиэтиленовых волокон и нитей, являющихся основой броневых органопластиков [1, 5]. Во-вторых, вследствие небольшого содержания связки в броневых органопластиках сохраняется ограниченная подвижность нитей. Поэтому

объем органопластиковой подложки, поглощающий кинетическую энергию пули, превосходит объем части подложки, располагающейся непосредственно под нижним основанием разрушенного керамического конуса (см. рис. 1). Для того чтобы это учесть, деформируемый объем увеличивают в β_s^2 раз, что соответствует увеличению диаметра деформируемой части подложки в β_s раз. В работе [7] путем обработки экспериментальных данных для органопластиков с параарамидной основой (кевлар) получено значение $\beta_s = 1.6$. Полагая объемную долю связующего равной λ , запишем соотношение

$$A_{30-п} = \frac{E_n \varepsilon_p^2}{2} \beta_s^2 V_{п}(1 - \lambda). \quad (6)$$

Подставляя соотношения (4) и (5), (6) в формулу (2) и разрешая ее относительно скорости ударника, получим формулы для предельной скорости пробития v керамико-металлической преграды

$$v = \sqrt{\frac{2(M_{уд1} + M_k + m_{п})}{M_{уд}^2} \xi_{п} \sigma_{п} \varepsilon_{п} V_{п} + \frac{2}{M_{уд}} \left(\xi_{уд} \sigma_{уд} \varepsilon_{уд} \Delta V_{уд} + \frac{\xi_k \sigma_{сж}^2}{2E} V_k \right)}, \quad (7)$$

и керамико-органопластиковой преграды

$$v = \sqrt{\frac{2(M_{уд1} + M_k + m_{п})}{M_{уд}^2} \frac{E_n \varepsilon_p^2}{2} \beta_s^2 V_{п}(1 - \lambda) + \frac{2}{M_{уд}} \left(\xi_{уд} \sigma_{уд} \varepsilon_{уд} \Delta V_{уд} + \frac{\xi_k \sigma_{сж}^2}{2E} V_k \right)}. \quad (8)$$

Начальная масса ударника $M_{уд}$ и масса оставшейся части ударника $M_{уд1}$ рассчитываются по формулам

$$M_{уд} = \rho_{уд} \frac{\pi d^2 l}{4}, \quad M_{уд1} = \rho_{уд} \frac{\pi d^2 (l - \Delta l)}{4}.$$

Масса керамического конуса равна произведению плотности керамики ρ_k на объем усеченного конуса V_k , который, в свою очередь, равен

$$V_k = \frac{\pi h}{12} (D^2 + d^2 + Dd).$$

Масса деформируемой части подложки $m_{п}$ равна произведению плотности материала подложки $\rho_{п}$ на ее объем $V_{п} = \pi \delta_{п} D^2 / 4$, где $\delta_{п}$ —

толщина подложки. Взаимосвязь между диаметром ударника d и диаметром основания керамического конуса D следует из рис. 1:

$$D = d + 2htg\alpha.$$

Одной из наиболее важных конструктивных характеристик защитной структуры является ее поверхностная плотность q — масса защитной структуры единичной площади поверхности. Очевидна взаимосвязь между q и характеристиками защитной структуры:

$$q = \rho_k h + \rho_{п} \delta.$$

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПРЕГРАД

Керамико-металлические преграды

Проверить адекватность формул (7) и (8) можно путем сравнения имеющихся экспериментальных данных и результатов расчета по этим формулам. Такое сравнение приведено в табл. 1. Использовались экспериментально определенные в [8] предельные скорости пробития двухслойной преграды, состоящей из слоя корундовой керамики плотностью $\rho_k = 3.85$ г/см³ и толщиной $\delta = 8.1$ мм и подложки из прочного алюминиевого сплава 6061-Т6. Стальной ударник с плоским торцом диаметром 6.0 мм и массой 7.0 г имел длину 31.5 мм или $5.3d$. Характеристики ударника близки к характеристикам стальных сердечников бронебойных пуль калибра 7.62 мм [1, 6].

В расчетах характеристики материалов ударника и преграды выбирались в соответствии с данными работ [1, 4-8]: предел прочности материала ударника и его предельная

Таблица 1

Предельные скорости пробития алюминиевой подложки, полученные экспериментально [8] и рассчитанные по формуле (7)

δ , мм	q , кг/м ²	v , м/с	
		эксперимент	расчет
4.0	42	786 ÷ 829	717
6.0	47.4	815 ÷ 916	900
8.0	52.8	995 ÷ 1091	1077

деформация $\sigma_{уд} = 2.5$ ГПа, $\varepsilon_{уд} = 0.12$. Коэффициент неоднородности деформации ударника принимался равным $\xi_{уд} = 1$. Полагалось также, что в процессе срабатывания ударник укорачивался в соответствии с соотношением $\Delta l = 1.5h$.

Модуль упругости керамики $E = 407$ ГПа, динамический предел прочности на сжатие $\sigma_k = 3$ ГПа, половина угла при вершине керамического конуса $\alpha = \pi/3$, коэффициент неоднородности деформирования керамики $\xi_k = 1$. Характеристики материала подложки из алюминиевого сплава 6061-T6 выбирались такими же, как и у отечественных броневых алюминиевых сплавов В-95 и В-96Ц1: $\rho_{п} = 2.7$ г/см³, $\sigma_{п} = 0.65$ ГПа, $\varepsilon_{п} = 0.12$ [1, с. 123]. Коэффициент неравномерности деформирования подложки принимался равным $\xi_{п} = 1$.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений v (см. табл. 1) показало, что они хорошо согласуются для преград с толщиной подложки 6 и 8 мм, а для первой преграды с толщиной подложки 4 мм различие достигает 10 ÷ 12 %.

Поскольку расчет по формуле (7) в целом удовлетворительно согласуется с известными экспериментальными данными, ее можно использовать для изучения баллистической стойкости керамико-металлических преград в зависимости от их структурных характеристик.

Представленные на рис. 2 зависимости предельной скорости пробития преград v от толщины подложки из алюминиевого сплава при разных поверхностных плотностях преграды с лицевым керамическим слоем из корундовой керамики Al_2O_3 имеют немонотонный характер.

Более отчетливо экстремальный характер проявляют зависимости предельной скорости пробития v от относительной толщины керамического слоя $\bar{h} = h/(h + \delta)$ (рис. 3). В диапазоне поверхностной плотности преграды $q = 30 \div 50$ кг/м² максимальное значение v достигается при $\bar{h} = 0.6 \div 0.65$. Этот важный результат позволяет говорить о принципиальной возможности оптимизации двухслойных преград с внешним керамическим слоем. В оптимальной преграде, соответствующей максимуму v , толщина керамического слоя из корунда должна превосходить толщину подложки из алюминиевого сплава в среднем в 1.7 раза. Согласно выполненным расчетам оптимальная толщина керамического слоя возрастает от 5.2 мм при

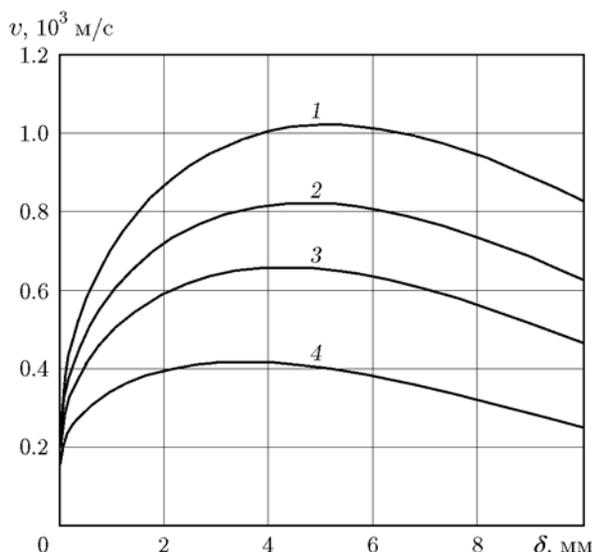


Рис. 2. Зависимость предельной скорости пробития двухслойной преграды от толщины подложки из алюминиевого сплава при поверхностных плотностях преграды 50 (1), 45 (2), 40 (3), 30 кг/м² (4)

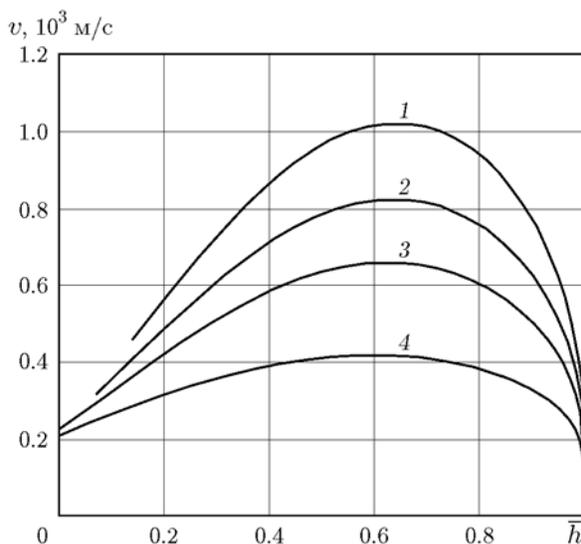


Рис. 3. Зависимость предельной скорости пробития двухслойной преграды от относительной толщины керамического слоя при поверхностных плотностях преграды 50 (1), 45 (2), 40 (3), 30 кг/м² (4)

$q = 30$ кг/м² ($v = 416$ м/с) до 9.3 мм при $q = 50$ кг/м² ($v = 1020$ м/с).

В работе [9] для оптимальной относительной толщины керамического слоя с той же подложкой получено значение $\bar{h}_{опт} = 0.77$, т. е. в оптимальной преграде толщина керамиче-

ского слоя из корунда должна превосходить толщину подложки из алюминиевого сплава в 3.35 раза в диапазоне поверхностной плотности $20 \div 60 \text{ кг/м}^2$. Такое чрезмерно большое различие в толщинах керамического и металлического слоев в оптимальной преграде можно объяснить, во-первых, малым углом раствора керамического конуса. В работе [9] $\alpha = 45^\circ$, что не соответствует экспериментальным данным [1]. Во-вторых, не учитывается потеря кинетической энергии ударника, а следовательно, и импульса ударника при его разрушении в период задержки проникания.

Для сравнения баллистической стойкости преград с металлическими подложками из различных материалов были выполнены аналогичные расчеты для титановых и стальных подложек. Их характеристики, взятые из [1, 6], приведены в табл. 2.

Результаты расчетов при поверхностной плотности преград $q = 50 \text{ кг/м}^2$ представлены на рис. 4 и 5. Как следует из полученных результатов, лучшими защитными свойствами обладают двухслойные преграды с титановой подложкой ($v = 1083 \text{ м/с}$, $\bar{h} = 0.75$), несколько худшими — преграды с алюминиевой подложкой ($v = 1020 \text{ м/с}$, $\bar{h} = 0.63$). Стальные подложки из броневых сталей при условии равенства поверхностных плотностей преград обеспечивают заметно меньшую предельную скорость пробития. При этом максимальное значение $v = 928 \text{ м/с}$ достигается при $\bar{h} = 0.85$, что соответствует толщине подложки 1.8 мм и толщине керамического слоя 10.2 мм ($q = 50 \text{ кг/м}^2$) (см. рис. 5). Следует отметить, что с уменьшением плотности материала подложки ее оптимальная толщина увеличивается.

Керамико-органопластиковые преграды

Для вычисления предельной скорости пробития керамико-органопластиковых преград использовалась формула (8). Физико-механические характеристики параармидного

Таблица 2
Характеристики материалов металлических подложек

Материал	ρ , г/см ³	$\sigma_{сж}$, ГПа	ε_n
Алюминиевый сплав	2.7	0.65	0.12
Титановый сплав	4.5	1.0	0.15
Броневая сталь	7.8	1.8	0.10

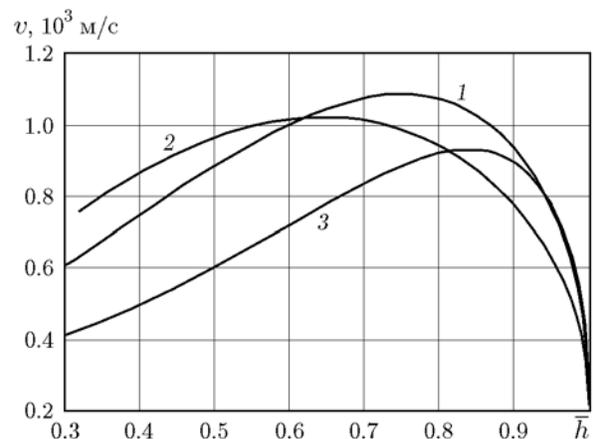


Рис. 4. Зависимость предельной скорости пробития двухслойных преград с титановой (1), алюминиевой (2) и стальной (3) подложками от относительной толщины керамического слоя

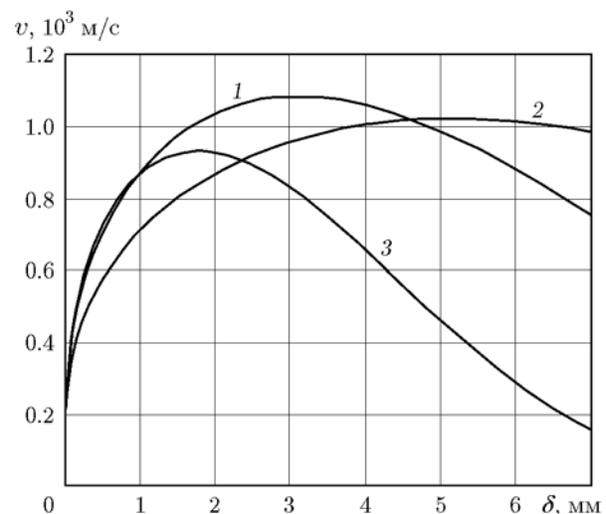


Рис. 5. Зависимость предельной скорости пробития двухслойных преград от толщины титановой (1), алюминиевой (2) и стальной (3) подложек

органопластикового композита выбраны следующими [1, 5]: плотность $\rho_n = 1.33 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; модуль упругости нитей $E_n = 120 \text{ ГПа}$; предельная деформация удлинения $\varepsilon_p = 0.035$; содержание связующего $\lambda = 0.25$. На рис. 6 приведены зависимости предельной скорости пробития двухслойных преград с различной поверхностной плотностью от толщины органо-пластиковых подложек, на рис. 7 — от относительной толщины керамического слоя. Эти зависимости показывают, что при поверхност-

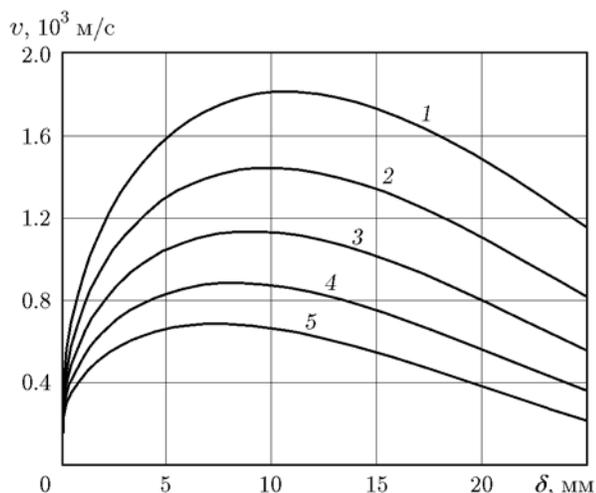


Рис. 6. Зависимость предельной скорости пробития двухслойной преграды от толщины органопластиковой подложки при поверхностных плотностях преграды 50 (1), 45 (2), 40 (3), 35 (4), 30 кг/м² (5)

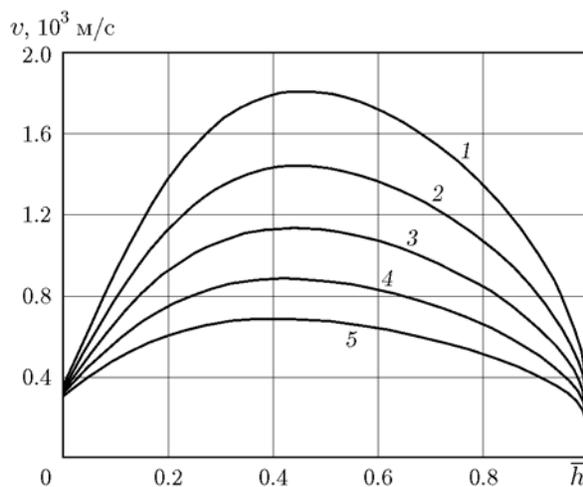


Рис. 7. Зависимость предельной скорости пробития двухслойной преграды от относительной толщины керамического слоя при поверхностных плотностях преграды 50 (1), 45 (2), 40 (3), 35 (4), 30 кг/м² (5)

ных плотностях преград $q = 30 \div 50$ кг/м² максимальная стойкость обеспечивается при небольшой относительной толщине керамического слоя $\bar{h} = 0.4 \div 0.45$. То есть в оптимальной преграде с органопластиковой подложкой толщина керамического слоя должна быть меньше толщины подложки в среднем в 1.36 раза, в то время как в оптимальных преградах с алюминиевой подложкой, наоборот, толщина керамического слоя должна превосходить толщину подложки в среднем в 1.7 раза. Данное обстоятельство позволяет обеспечивать защиту от высокоэнергетических ударников с помощью керамики-органопластиковых преград с приемлемой поверхностной плотно-

стью. При $q = 35$ кг/м² и $h_k = 6.25$ мм, согласно расчетам, $v = 880$ м/с, что достаточно для защиты от бронебойных пуль снайперской винтовки СВД.

Расчетные значения максимальной скорости пробития и соответствующие оптимальные значения относительной толщины керамики для разных поверхностных плотностей и разных материалов подложки двухслойных преград приведены в табл. 3.

Несмотря на то, что приведенные в табл. 3 результаты расчетов имеют оценочный характер, они согласуются с известными экспериментальными данными. Поэтому формулы (7) и (8) после уточнения входящих в них физико-

Таблица 3
Скорость пробития оптимальных двухслойных преград с лицевым слоем из корундовой керамики стальным ударником диаметром 6 мм и массой 7 г

q , кг/м ²	v , м/с, при материале подложки			
	органопластик, $\bar{h}_{\text{опт}} = 0.4 \div 0.45$	титановый сплав, $\bar{h}_{\text{опт}} = 0.73 \div 0.74$	алюминиевый сплав, $\bar{h}_{\text{опт}} = 0.6 \div 0.65$	сталь, $\bar{h}_{\text{опт}} = 0.82 \div 0.84$
30	680	473	416	386
35	880	578	550	510
40	1 129	695	657	602
45	1 436	871	820	751
50	1 806	1 082	1 019	928

механических характеристик материалов могут использоваться в инженерной практике не только для расчета предельных скоростей пробития двухслойных преград, но и для оптимизации их структуры.

ВЫВОДЫ

1. Получены аналитические формулы для предельной скорости пробития двухслойных керамико-металлических и керамико-органопластиковых преград, учитывающие структурные характеристики и физико-механические свойства материалов ударника и преграды.

2. С помощью полученных формул выполнено исследование баллистической стойкости преград и показана возможность оптимизации их структуры.

3. В диапазоне поверхностной плотности преграды $q = 30 \div 50 \text{ кг/м}^2$ для разных материалов подложек определены оптимальные относительные толщины $\bar{h}_{\text{опт}}$ керамического слоя, обеспечивающие максимальную предельную скорость пробития. Оказалось, что значение $\bar{h}_{\text{опт}}$ слабо зависит от q и определяется свойствами материала подложки. Полученные значения $\bar{h}_{\text{опт}}$ распределяются следующим образом: для органопластика $\bar{h}_{\text{опт}} = 0.4 \div 0.45$, для алюминиевого сплава $\bar{h}_{\text{опт}} = 0.6 \div 0.65$, для титанового сплава $\bar{h}_{\text{опт}} = 0.73 \div 0.74$, для стали $\bar{h}_{\text{опт}} = 0.82 \div 0.84$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кобылкин И. Ф., Селиванов В. В.** Материалы и структуры легкой бронезащиты. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
2. **Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T.** High-Speed Penetration Dynamics: Engineering Models and Methods. — World Scientific Publ. Co., 2013. — P. 589–607.
3. **Recht R. F.** High velocity impact dynamics: analytical modeling of plate penetration dynamics // High Velocity Impact Dynamics / J. A. Zucas (Ed.). — New York: John Wiley and Sons, 1990. — P. 443–513.
4. **Беспалов И. А., Григорян В. А., Кобылкин И. Ф.** Экспериментальное определение времени задержки проникания высокоскоростных ударников в керамическую броню // Вопр. оборон. техники. Сер. 15. Композиц. неметал. материалы в машиностроении. — 2011. — Вып. 1–2. — С. 34–38.
5. **Легкие баллистические материалы** / под ред. А. Бхатнагара / пер. с англ. под ред. С. Л. Баженова. — М.: Техносфера, 2011.
6. **Григорян В. А., Кобылкин И. Ф., Маринин В. М. и др.** Материалы и структуры для локального и индивидуального бронирования. — М.: РадиоСофт, 2008.
7. **Walker J. D.** Ballistic limit of fabrics with resin // Proc. of the Nineteenth Intern. Symp. on Ballistics, Interlaken, Switzerland, 2001.
8. **Reijer P. C.** Impact on Ceramic Faced Armor: PhD Thesis / Delft Univ. of Technology. — The Netherlands, 1991. — P. 123–130.
9. **Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T.** Improved Florence model and optimization of two-component armor against single impact or two impacts // Compos. Struct. — 2009. — V. 88. — P. 158–165.

*Поступила в редакцию 10/X 2016 г.,
в окончательном варианте — 16/I 2017 г.*