

УДК 623.445+530.411.5

## ПРОБИВАНИЕ ДВУХСЛОЙНЫХ ПРЕГРАД С ВНЕШНИМ КЕРАМИЧЕСКИМ СЛОЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УДАРНИКОВ ПОД УГЛОМ

И. Ф. Кобылкин, А. А. Горбатенко

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва  
kobylikin\_ivann@mail.ru

Выполнено трехмерное численное моделирование взаимодействия ударника, направленного под углом, с двухслойной преградой с внешним керамическим слоем. Показано, что наличие керамического слоя нормализует процесс пробития: основное деформирование и перемещение элементов преграды происходит так, как если бы воздействие ударника осуществлялось по нормали к поверхности преграды. Обнаружен достаточно интенсивный разворот остатков ударника на заключительных стадиях взаимодействия. С использованием экспериментальных данных и предположения о трансформации удара под углом в эквивалентный удар по нормали разработана приближенная аналитическая методика расчета предельной скорости пробития двухслойной керамико-металлической преграды при воздействии ударником под углом.

Ключевые слова: пробивание, двухслойная керамико-металлическая преграда, воздействие под углом, предельная скорость пробития.

DOI 10.15372/FGV20180613

### ВВЕДЕНИЕ

Двухслойные преграды, состоящие из внешнего керамического слоя и металлической или композитной подложки, являются весьма эффективной защитой от действия бронебойных пуль, обладающих высокой проникающей способностью [1]. Высокая противопульная стойкость таких преград обеспечивается наличием керамики — высокотвердого, но очень хрупкого материала.

Основной объем исследований по изучению противопульной стойкости различных броневых преград относится к воздействию пуль по нормали к поверхности преграды. Обусловлено это, по-видимому, тем, что стойкость наиболее часто используемых металлических броневых преград минимальна при воздействии кинетических средств поражения по нормали к преграде. При отклонении направления воздействия от нормали на угол  $\theta$  толщина преграды  $b_\theta$  в направлении воздействия возрастает пропорционально  $\cos^{-1}\theta$  и в соответствии с этим возрастает ее защищающая способность. Опыт показывает, что в первом приближении для большинства однородных преград предельная пробиваемая толщина преграды  $b_{пр}$  в направлении воздействия средства поражения не

зависит от угла воздействия [2]. Тогда реальная толщина брони  $b$ , обеспечивающая защиту от данного средства поражения, будет равна

$$b = b_{пр} \cos \theta. \quad (1)$$

Поэтому для уменьшения массы бронезащиты всегда стараются увеличить угол наклона защитных преград к возможному направлению воздействия кинетических средств поражения. Соотношение (1) иногда называют правилом баллистической эквивалентности [3, 4].

Возникает вопрос, справедливо ли это правило для двухслойных преград с внешним керамическим слоем. Защищающая способность керамики определяется не только ее прочностным и инерционным сопротивлением прониканию средства поражения, но и временем задержки проникания  $t_p$ , в течение которого происходит разрушение головной части пули и формируется коническая область разрушенной керамики, способствующая увеличению площади воздействия на последующие слои преграды [1].

Важной конструктивной характеристикой защитной структуры является ее поверхностная плотность  $q$  — масса защитной структуры единичной площади поверхности. Очевидна взаимосвязь между  $q$  и характеристиками защитной структуры:

$$q = \rho_k h + \rho_n \delta,$$

где  $\rho_k$ ,  $\rho_n$  — плотности соответственно керамики и подложки, на которую приклеивается керамика;  $h$ ,  $\delta$  — толщины керамического слоя и подложки. В терминах поверхностной плотности защитной структуры правило баллистической эквивалентности может быть записано следующим образом:

$$q_\theta = q_n \cos \theta, \quad (2)$$

где  $q_n$  и  $q_\theta$  — поверхностные плотности эквивалентных преград, воздействие на которые осуществляется соответственно по нормали и под углом  $\theta$ .

Одним из первых исследований, в которых для двухслойных преград с внешним керамическим слоем было обнаружено отклонение от правила баллистической эквивалентности, была работа [5]. При обстреле под углом комбинированных бронезащитных элементов из керамики  $Al_2O_3$  со стальными и алюминиевыми подложками бронепробойными пулями калибром 7.62 мм было установлено, что эквивалентная защищающая способность бронезащитных элементов достигается при их большей поверхностной плотности, чем это следует из правила баллистической эквивалентности (2). Эквивалентная поверхностная плотность при обстреле под углом уменьшается пропорционально  $\sqrt{\cos \theta}$ , а не  $\cos \theta$ , как это требует правило баллистической эквивалентности (1). Соотношение между поверхностными плотностями  $q$ , обеспечивающими одинаковую защиту при воздействии пули под углом  $q_\theta$  и по нормали  $q_n$ , согласно работам [5, 6] имеет вид

$$q_\theta = q_n \sqrt{\cos \theta}. \quad (3)$$

Ниже эту зависимость будем называть формулой Хезерингтона.

В работе [7] в серии экспериментов осуществлялся обстрел бронепробойными пулями AP M2 калибром 7.62 мм по нормали и под углами  $45^\circ$  и  $60^\circ$  бронезащитных элементов из керамики  $Al_2O_3$ , приклеенной на подложку из алюминиевого сплава 6061-T6. Толщина керамических элементов изменялась в пределах  $3.1 \div 9.2$  мм, толщина алюминиевой подложки составляла  $3.1 \div 6.6$  мм. Конструкцию бронезащитных элементов выбирали таким образом, что их поверхностная плотность в направлении воздействия для

сравниваемых вариантов воздействия по нормали и под углом сохранялась примерно одинаковой. Полученные результаты также свидетельствуют о том, что при сохранении поверхностной плотности на одном и том же уровне защищающая способность исследуемых бронезащитных элементов при воздействии по нормали выше, чем при воздействии под углом.

### ЭФФЕКТ НОРМАЛИЗАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ В КЕРАМИЧЕСКОМ СЛОЕ ПРИ УДАРЕ ПОД УГЛОМ

Понять обнаруженное отклонение от правила баллистической эквивалентности можно, распространив механизм разрушения керамики в конической области при воздействии по нормали на случай воздействия кинетического средства поражения под углом в соответствии с рис. 1.

В связи с высокой скоростью распространения волн сжатия и разрежения в керамике ( $\approx 10$  км/с) формирование разрушенной области при воздействии под углом будет происходить в конической области с осью симметрии, совпадающей с нормалью к поверхности преграды, проведенной через начальную точку ударного взаимодействия пули или ее сердечника с преградой (рис. 1, б).

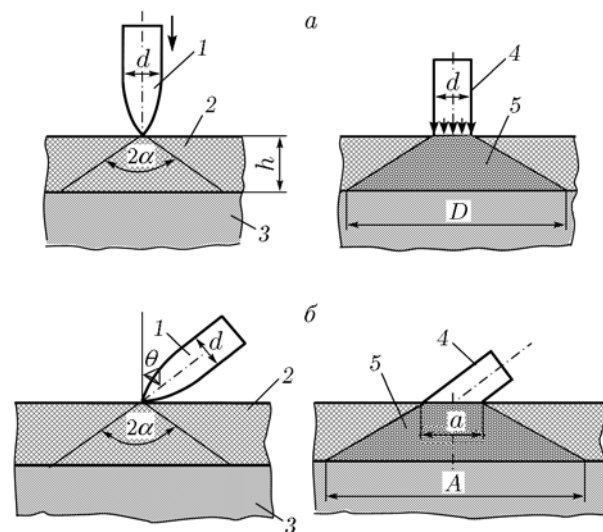


Рис. 1. Формирование разрушенной области в слое керамики при воздействии пули по нормали (а) и под углом (б):

1 — пуля или ее сердечник, 2 — керамика, 3 — подложка, 4 — остаток пули или ее сердечника в момент начала их проникания в разрушенную керамику, 5 — разрушенная область

Факт нормализации области разрушения в преграде при наклонном ударе подтверждается разделением запреградных осколков, образующихся из разрушенной области преграды при ее высокоскоростном пробивании, на поток осколков, направленный преимущественно по нормали к поверхности преграды, и поток фрагментов разрушенного ударника, направленные скорости которых близко к первоначальной траектории ударника [8].

Симметрию области разрушенной керамики подтверждает также равномерное расположение радиальных трещин в круговой области лицевой поверхности с центром в точке первоначального контакта пули с керамическим слоем [3, 4] независимо от угла воздействия.

Исходя из этого можно сделать вывод, что разрушение керамики осуществляется в волнах сжатия и разрежения, распространяющихся по нормали к поверхности, следовательно, время задержки проникания, в течение которого керамика разрушается [1], будет определяться толщиной слоя керамики независимо от его наклона к направлению действия пули. Поскольку в экспериментах, представленных в работах [5–7], при воздействии под углом в бронезементах использовались более тонкие слои керамики, то они разрушались раньше, чем в бронезементах, воздействие на которые осуществлялось по нормали. Иными словами, в условиях эксперимента выполнялось неравенство  $t_{p\theta} \leq t_{pn}$ . Следовательно, на начальной стадии при воздействии под углом пуля срабатывает (укорачивается) на меньшую длину, чем при воздействии по нормали. И несмотря на то, что дальнейшее проникание через разрушенную керамику и подложку происходит вдоль одинакового пути, защищающая способность наклонного бронеземента оказывается более низкой по сравнению с бронезементами, обстрел которого ведется по нормали к его поверхности. Подчеркнем, что этот вывод относится к бронезементам, толщина компонентов которых удовлетворяет правилу баллистической эквивалентности  $h_\theta = h_n \cos \theta$ ,  $\delta_\theta = \delta_n \cos \theta$ , где индексы  $n$  и  $\theta$  относятся к бронезементам, обстрел которых проводится соответственно по нормали и под углом.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Численное моделирование взаимодействия ударника с керамико-металлической преградой под углом проводили в программном па-

кете LS-Dyna в трехмерной постановке. Для решения задачи использовался бессеточный метод сглаженных частиц (smoothed particle hydrodynamics, SPH). Расстояние между центрами частиц составляло 0.4 мм.

В задаче керамический слой из корунда толщиной 8 мм, расположенный на подложке из алюминиевого сплава Al7075-T651 толщиной 4 мм, пробивался удлинённым ударником из стали У12а диаметром 6.5 мм и длиной 30 мм. Скорость ударника составляла 830 м/с. Анализировалось взаимодействие при углах наклона керамико-металлической преграды 30, 40 и 50°. Уравнение состояния стали и алюминиевого сплава задавалось в форме Ми — Грюнайзена, их механическое поведение описывалось уравнением Джонсона — Кука [9]. Модель Джонсона — Кука является эмпирической и позволяет учитывать эффекты деформационного и кинематического упрочнения и термического разупрочнения. В этой модели напряженное пластическое течение определяется формулой

$$Y = (A + B\varepsilon_p^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_{пл} - T_0} \right)^m \right],$$

где  $A$  — предел текучести материала в исходном состоянии,  $B$  — коэффициент (модуль) деформационного упрочнения,  $n$  — показатель деформационного упрочнения,  $C$  — коэффициент упрочнения при высокоскоростном деформировании,  $\varepsilon_p$  — интенсивность пластических деформаций,  $\dot{\varepsilon}_p$  — интенсивность тензора скоростей пластических деформаций,  $\dot{\varepsilon}_0 = 1$  — масштабная скорость деформаций,  $T_0$  — начальная температура,  $T_{пл}$  — температура плавления,  $m$  — показатель термического разупрочнения.

Материал, описываемый моделью Джонсона — Кука, считается разрушенным, если параметр поврежденности

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon_p}{\varepsilon_f}$$

становится равным единице. Здесь  $\Delta\varepsilon_p$  — изменение интенсивности пластической деформации,  $\varepsilon_f$  — деформация разрушения, определяемая из выражения

$$\varepsilon_f = \max \left( \left\{ D_1 + D_2 \exp \left[ D_3 \frac{p}{\sigma_{eff}} \right] \left[ 1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon} p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[ 1 + D_5 \left( \frac{T - T_0}{T_{пл} - T_0} \right) \right] \right\}, EF_{\min} \right),$$

где  $p$  — давление,  $\sigma_{eff}$  — эффективное напряжение,  $D_1, \dots, D_5$  — параметры разрушения,  $EF_{\min}$  — минимальная деформация, при которой происходит разрушение материала. Более

подробные сведения можно найти в работе [9]. Значения констант модели для стали и алюминиевого сплава приведены в табл. 1.

Уравнение состояния керамики — полиномиальное, механическое поведение керамики описывалось с помощью модели деформирования и разрушения упругохрупких материалов Джонсона — Холмквиста [10]. В этой модели предел прочности хрупкого материала  $\sigma$  в процессе его разрушения меняется от предела прочности исходного неповрежденного материала  $\sigma_0$  до предела прочности полностью разрушенного (измельченного) материала  $\sigma_p$ . Соответствующее уравнение имеет вид

$$\sigma = \sigma_0 - D(\sigma_0 - \sigma_p),$$

где поврежденность  $0 \leq D \leq 1$  определяется как относительная накопленная необратимая (пластическая) деформация. Пределы прочности неповрежденного и полностью разрушенного материалов зависят от текущих давления и скорости деформации  $\dot{\varepsilon}$ :

$$\sigma_0 = A(P + T_p)^N \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right),$$

$$\sigma_p = BP^M \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right),$$

где  $P = p/Y$  — безразмерное давление,  $Y$  — предел упругости Гюгонио,  $A, N, C, B, M$  — постоянные. Предел прочности разрушенной

Таблица 1  
Постоянные модели Джонсона — Кука

Постоянная	Значение		
	сталь У12а	Al7075-T651	
Модель Джонсона — Кука			
Модуль сдвига $G$ , ГПа	65.08	26.9	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7 810	2 810	
Предел текучести $A$ , МПа	1 370	520	
Предел прочности, МПа	1 570	572	
$B$ , МПа	476.8	477	
$n$	0.18	0.52	
$C$	0.012	0.0025	
$m$	1	1.61	
$T_0$ , К	293	293	
$T_{пл}$ , К	1 873	933	
Параметры модели разрушения			
$D_1$	-0.8	0.096	
$D_2$	2.1	0.049	
$D_3$	-0.5	3.465	
$D_4$	0.002	0.016	
$D_5$	0.61	1.099	
$EF_{\min}$	0.09	0.11	
Уравнение состояния			
Коэффициенты уравнения ударной адиабаты			
	$a$ , м/с	4 569	5 240
	$b$	1.49	1.4
Коэффициент Грюнайзена $\Gamma$		1.7	1.97

Таблица 2  
Постоянные модели Джонсона — Холмквиста

Постоянная	Значение
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	3 900
$A$	0.93
$B$	0.31
$C$	0.007
$M$	0.6
$N$	0.6
Модуль сдвига, ГПа	152
Модуль упругости, ГПа	407
Предел прочности на растяжение, МПа	260
$Y$ , МПа	6 570
$g$	1.4

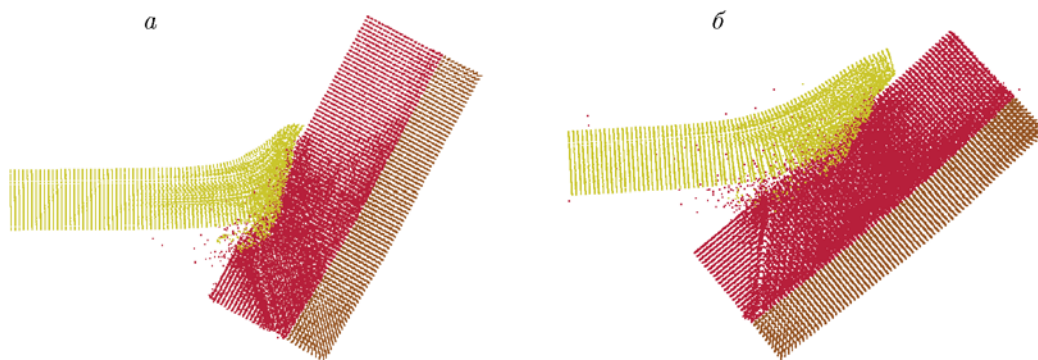


Рис. 2. Формирование разрушенного конуса в керамическом слое при воздействии ударников под углами  $\theta = 30^\circ$  (а) и  $50^\circ$  (б) ( $t = 10$  мкс)

керамики ограничен сверху величиной  $\sigma_{p\max} = gY$ , где  $g$  — постоянная. Более подробные сведения о модели Джонсона — Холмквиста можно найти в работах [1, 10]. Значения констант модели для корундовой керамики приведены в табл. 2.

Модели Джонсона — Кука и Джонсона — Холмквиста интегрированы в программный комплекс ANSYS. Поэтому для других материалов значения постоянных можно выбирать либо из блоков уравнений состояния ANSYS Autodyn, либо из таблиц 9B1 и 9B8 книги [11, с. 572, 579].

Результаты численного моделирования в основном подтвердили предполагаемый механизм взаимодействия ударников, направляемых под углом, с комбинированными преградами с внешним керамическим слоем. На рис. 2 показано формирование разрушенных конических областей в керамическом слое, ориентированных примерно по нормали к поверхности преграды, при воздействии под двумя углами.

На рис. 3 приведены конфигурации взаимодействия ударников, направляемых под разными углами, с керамико-металлическими преградами в различные моменты времени. Из их анализа следует, что наличие керамического слоя как бы нормализует процесс пробития: основное деформирование и перемещение элементов преграды происходят так, как если бы воздействие ударника осуществлялось по нормали к поверхности преграды.

Несколько неожиданным явился обнаруженный достаточно интенсивный разворот ударника на заключительных стадиях взаимодействия. Например, при угле воздействия  $\theta = 50^\circ$  к моменту времени от начала взаимодействия  $t = 67$  мкс ударник развернулся на  $30^\circ$ .

По-видимому, это обусловлено невысоким сопротивлением разрушенной керамики вращательному движению остатков ударника. Обращает на себя внимание также более интенсивное срабатывание ударника на заключительных стадиях взаимодействия при увеличении угла воздействия.

### АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНИКА С ДВУХСЛОЙНОЙ ПРЕГРАДОЙ ПРИ УДАРЕ ПОД УГЛОМ

Численное моделирование процесса взаимодействия ударника с двухслойной керамико-металлической преградой в трехмерной постановке достаточно трудоемко и поэтому вряд ли применимо в инженерной практике разработки оптимальных защитных структур. В связи с этим была разработана приближенная аналитическая методика анализа процесса взаимодействия ударника с двухслойной преградой с внешним керамическим слоем под углом, основанная на трансформации удара под углом в эквивалентный удар по нормали в соответствии с рис. 1. Соответствующая аналитическая методика пробития двухслойной преграды при воздействии по нормали представлена в работе [12].

При ударе под углом вместо кругового конуса разрушенной керамики, образующегося при ударе по нормали, в керамике разрушенная область будет ограничена эллипсоидным конусом. Меньшее основание этого конуса на лицевой поверхности керамического слоя будет иметь форму эллипса с большой осью  $a = d/\cos\theta$  и малой осью  $b = d$ . Большее основание конуса на границе раздела с подложкой будет

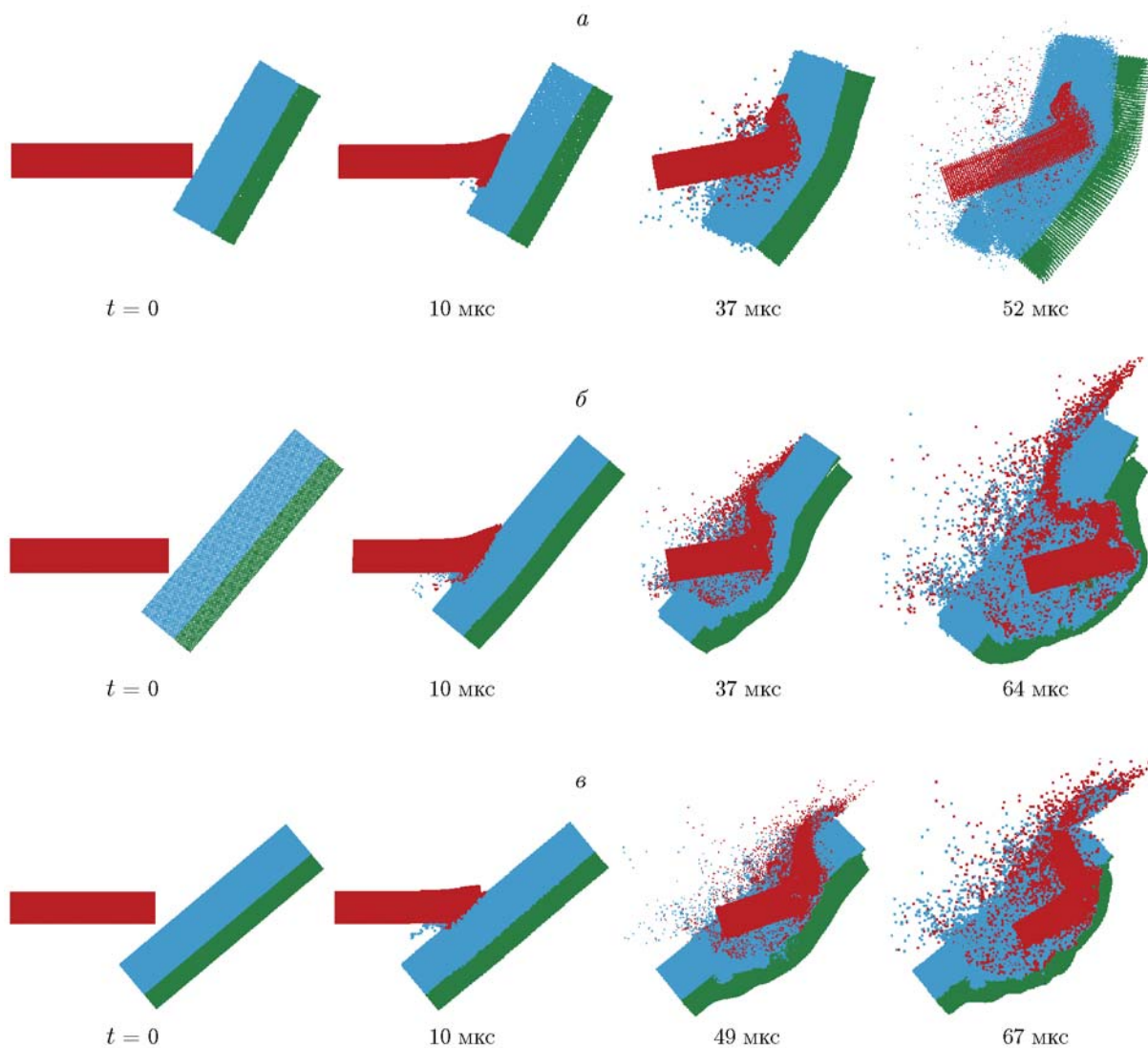


Рис. 3. Конфигурации взаимодействия стального ударника с двухслойной преградой в различные моменты времени под углами  $\theta = 30^\circ$  (а),  $40^\circ$  (б) и  $50^\circ$  (в)

иметь оси соответственно  $A = d/\cos \theta + 2h \operatorname{tg} \alpha$ ,  $B = d + 2h \operatorname{tg} \alpha$ . Площади верхнего  $s$  и нижнего  $S$  оснований разрушенного керамического конуса равны

$$s = \frac{\pi d^2}{4 \cos^2 \theta},$$

$$S = \frac{\pi}{4} \left( \frac{d}{\cos \theta} + 2h \operatorname{tg} \alpha \right) (d + 2h \operatorname{tg} \alpha).$$

Объем разрушенного керамического конуса  $V_k$  может быть вычислен с помощью соотношения

$$V_k = \frac{h}{3} (s + S + \sqrt{sS}).$$

Помимо увеличения объема  $V_k$  и массы  $M_k$  эллипсоидного керамического конуса, увеличивается также площадь воздействия на подложку, что должно привести к увеличению поглощаемой подложкой энергии при ее деформировании. Масса деформируемой части подложки  $m_{\text{п}}$  равна произведению плотности материала подложки  $\rho_{\text{п}}$  на ее объем  $V_{\text{п}} = \pi \delta_{\text{п}} S$ .

Разрушившийся или сработавшийся объем ударника  $\Delta V_{\text{уд}}$  приближенно можно определить по формуле

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

где  $\Delta l$  — укорочение ударника, которое может быть оценено по соотношению  $\Delta l \approx v_0 t_{\text{р}}$ .

Обычно  $\Delta l$  задается в виде  $\Delta l = nh$ , где  $n$  — коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально или с помощью численного моделирования. Укорочение бронебойно-зажигательной пули Б-32 калибра 7.62 мм при взаимодействии с керамиками  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiC}$  в широком диапазоне скоростей в среднем составляет  $\Delta l = (1.2 - 1.9)h$  [1, с. 139]. В работе [12] в расчетных формулах предполагается, что укорочение ударника пропорционально толщине керамического слоя с осредненным значением  $n = 1.5$ :  $\Delta l = 1.5h$ . При воздействии под углом  $\theta$  в это соотношение в соответствии с моделью взаимодействия (см. рис. 1) вместо  $h$  следует подставлять  $h \cos \theta$ .

Формула для расчета предельной скорости пробития двухслойной керамико-металлической преграды при воздействии ударника по нормали получена в работе [12]:

$$v^n = \sqrt{\frac{2(M_{\text{уд1}} + M_{\text{к}} + m_{\text{п}})}{M_{\text{уд}}^2} \xi_{\text{п}} \sigma_{\text{п}} \varepsilon_{\text{п}} V_{\text{п}} + \frac{2}{M_{\text{уд}}} \left( \xi_{\text{уд}} \sigma_{\text{уд}} \varepsilon_{\text{уд}} \Delta V_{\text{уд}} + \frac{\xi_{\text{к}} \sigma_{\text{сж}}^2}{2E} V_{\text{к}} \right)}. \quad (4)$$

Здесь  $M_{\text{уд}}$  — начальная масса ударника;  $M_{\text{уд1}}$  — масса оставшейся части ударника;  $\sigma_{\text{п}}$ ,  $\varepsilon_{\text{п}}$  — динамический предел текучести и предельная деформация удлинения материала металлической подложки;  $\xi_{\text{п}}$  — коэффициент, учитывающий неравномерность и динамический характер деформации части подложки, расположенной под выбиваемым керамическим конусом;  $\sigma_{\text{уд}}$ ,  $\varepsilon_{\text{уд}}$  — динамический предел текучести и предельная деформация материала ударника;  $\xi_{\text{уд}}$  — коэффициент, учитывающий неоднородность и динамический характер деформации ударника;  $\Delta V_{\text{уд}}$  — объем разрушившейся или сработавшейся части ударника;  $\sigma_{\text{сж}}$  — предел прочности керамики на сжатие;  $E$  — модуль упругости керамики;  $\xi_{\text{к}}$  — коэффициент, учитывающий неоднородность деформации керамики в разрушенном конусе. Формулы для вычисления перечисленных величин и обоснования численных значений параметров приведены в работе [12].

Однако остается неясным вопрос о том, к какой составляющей скорости ударника применять формулу (4). Попытки рассчитать предельные скорости ударников, применяя эту формулу для нормальных составляющих скоростей ударников, к успеху не привели, что

стало следствием сложного движения ударника в керамическом слое. Единственным надежным экспериментальным фактом зависимости противопульной стойкости двухслойных преград с внешним керамическим слоем от угла воздействия является формула Хезерингтона (3), связывающая эквивалентные поверхностные плотности преград при воздействии по нормали  $q_n$  и под углом  $q_\theta$ , при которых предельные скорости пробития преград были примерно одинаковыми [6, 7]. Поэтому для расчета предельной скорости ударника использовалось соотношение

$$v(\theta) = v^n / (\cos \theta)^k,$$

где  $v^n$  получено из (4). Показатель  $k$  определялся исходя из согласия расчетных эквивалентных поверхностных плотностей преград с формулой Хезерингтона. Удовлетворительное согласие достигнуто при  $k \approx 0.5$ . На рис. 4 представлены зависимости предельных скоростей пробития двухслойных преград от относительной толщины керамического слоя  $\bar{h} = h/(h + \delta)$  при воздействии по нормали и под углами  $45^\circ$  и  $60^\circ$ .

Вычисленные значения поверхностной плотности преград  $q$  при оптимальной относительной толщине керамических слоев  $\bar{h} \approx 0.6$  и при условии близости предельных скоростей пробития при различных углах воздействия соответствуют формуле Хезерингтона с отклонением, не превышающим 8 %. Полученный результат позволяет сделать вывод о возможности использования разработанной модели в инженерной практике.

На рис. 5 приведены зависимости предельной скорости пробития двухслойных преград с поверхностной плотностью  $q = 35 \text{ кг/м}^2$  от толщины алюминиевой подложки при углах воздействия  $\theta = 0 \div 60^\circ$ . Зависимости имеют экстремальный характер, что позволяет оптимизировать структуру защитной преграды. Так, например, для рассматриваемой преграды с поверхностной плотностью  $q = 35 \text{ кг/м}^2$  оптимальная толщина подложки из высокопрочного алюминиевого сплава равна 4.65 мм. Толщина керамического слоя из корунда, вычисленная по формуле

$$h = (q - \rho_{\text{п}} \delta) / \rho_{\text{к}},$$

составляет 5.83 мм. Поверхностная плотность керамического слоя такой толщины, равная  $22.45 \text{ кг/м}^2$ , составляет 64 % от поверхностной

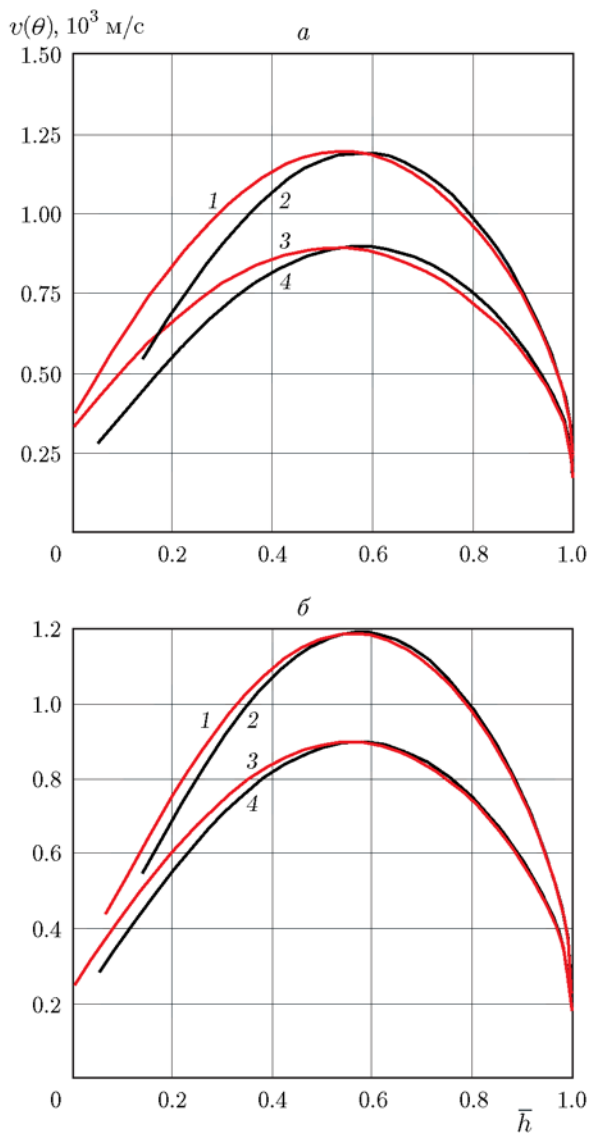


Рис. 4. Зависимость предельной скорости пробития двухслойных преград от относительной толщины керамического слоя:  
 а: 1 —  $q_\theta = 26.7$  кг/м<sup>2</sup>,  $\theta = 60^\circ$ ; 2 —  $q_n = 35$  кг/м<sup>2</sup>,  $\theta = 0$ ; 3 —  $q_\theta = 31.3$  кг/м<sup>2</sup>,  $\theta = 60^\circ$ ; 4 —  $q_n = 40$  кг/м<sup>2</sup>,  $\theta = 0$ ; б: 1 —  $q_\theta = 35.7$  кг/м<sup>2</sup>,  $\theta = 45^\circ$ , 2 —  $q_n = 40$  кг/м<sup>2</sup>,  $\theta = 0$ ; 3 —  $q_\theta = 31$  кг/м<sup>2</sup>,  $\theta = 45^\circ$ ; 4 —  $q_n = 35$  кг/м<sup>2</sup>,  $\theta = 0$

плотности преграды. Этот результат соответствует эмпирическому правилу, согласно которому 2/3 массы двухслойной брони с внешним керамическим слоем должна занимать керамика [13]. При больших углах воздействия ( $\theta = 60^\circ$ ) оптимальная толщина керамического слоя уменьшается до  $\bar{h} \approx 0.5$ , что также соответствует известным экспериментальным данным

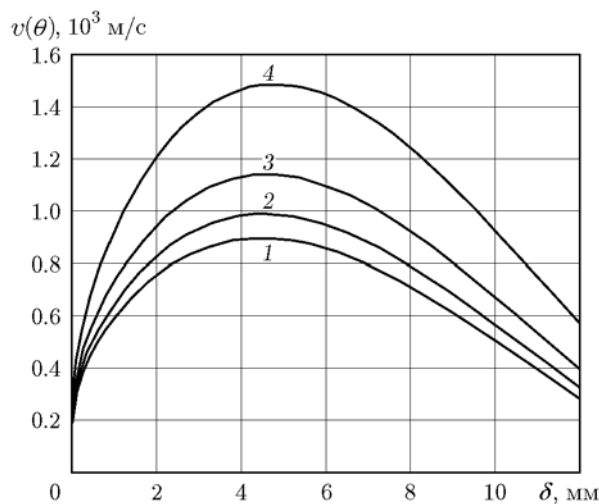


Рис. 5. Зависимость предельной скорости пробития двухслойных преград с поверхностной плотностью  $q = 35$  кг/м<sup>2</sup> от толщины алюминиевой подложки при углах воздействия  $\theta = 0$  (1),  $30^\circ$  (2),  $45^\circ$  (3),  $60^\circ$  (4)

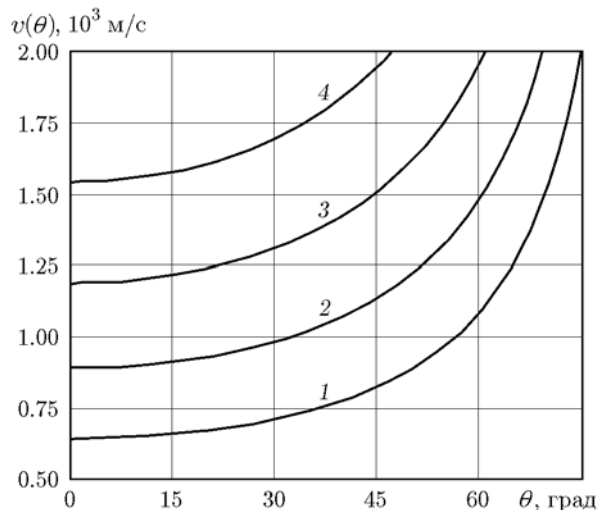


Рис. 6. Зависимость предельной скорости пробития двухслойных преград с различной поверхностной плотностью от угла воздействия:  $\delta = 5$  мм,  $q = 30$  (1), 35 (2), 40 (3), 45 кг/м<sup>2</sup> (4)

[6, 7].

На рис. 6 приведены расчетные зависимости предельной скорости пробития преград с различной поверхностной плотностью от угла воздействия. Как правило, зависимости такого типа наиболее часто определяются экспериментально. Они могут использоваться для корректировки механических характеристик взаи-



модействующих материалов и расчетных параметров модели.

## ВЫВОДЫ

1. Анализ литературных данных показал, что противоположная стойкость двухслойных керамико-металлических преград при их обстреле под углом не следует правилу баллистической эквивалентности. Эквивалентная поверхностная плотность преграды уменьшается пропорционально  $\sqrt{\cos \theta}$ , а не  $\cos \theta$ , как это требует правило баллистической эквивалентности.

2. Вследствие того, что разрушение керамики осуществляется в волнах сжатия и разрежения, распространяющихся по нормали к поверхности, время задержки проникания, в течение которого происходит разрушение керамики, определяется толщиной слоя керамики независимо от его наклона к направлению воздействия пули. Поэтому при воздействии под углом на керамический слой толщиной  $h$  на стадии задержки проникания пули срабатывается (укорачивается) на меньшую длину, чем при воздействии по нормали на керамический слой эквивалентной толщины  $h/\cos \theta$ , что и объясняет ее повышенную проникающую способность.

3. Трехмерное численное моделирование взаимодействия ударников с комбинированными преградами с внешним керамическим слоем под углом показало, что наличие керамического слоя нормализует процесс пробития — основное деформирование и перемещение элементов преграды происходит так, как если бы воздействие ударника осуществлялось по нормали к поверхности преграды. Обнаружен достаточно интенсивный разворот остатков ударников в процессе проникания в разрушенную керамику.

4. Предложена приближенная аналитическая методика, позволяющая анализировать взаимодействие под углом ударников с двухслойными керамико-металлическими преградами и рассчитывать предельные скорости их пробития с учетом структурных характеристик преграды и физико-механических свойств материалов преграды и ударника. Согласие результатов расчета с известными экспериментальными данными и практическими рекомендациями позволяет сделать вывод о возможно-

сти использования разработанной методики в инженерной практике.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Кобылкин И. Ф., Селиванов В. В.** Материалы и структуры легкой бронезащиты. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
2. **Частные** вопросы конечной баллистики / В. А. Григорян, Н. С. Дорохов, И. Ф. Кобылкин и др. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
3. **Zaera R., Sanchez-Galvez V.** Analytical modeling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal light-weight armours // Intern. J. Impact Eng. — 1998. — V. 21. — P. 133–148.
4. **Zaera R.** Ballistic impact on polymer matrix composites, composite armor, personal armor // Impact Engineering of Composite Structures / S. Abrate (Ed.). — New York: Springer, 2011. — P. 305–403.
5. **Hetherington J. G., Lemieux P. F.** The effect of obliquity on the ballistic performance of two component composite armours // Intern. J. Impact Eng. — 1994. — V. 15. — P. 131–137.
6. **Sadanadan S., Hetherington J. G.** Characterization of ceramic/steel and ceramic/aluminum armours subjected to oblique impact // Intern. J. Impact Eng. — 1997. — V. 19. — P. 811–819.
7. **Yaziv D., Chocron S., Anderson C. E., Grosch D. J.** Oblique penetration in ceramic targets // Proc. 19th Intern. Symp. on Ballistics, Inerlaken, Switzerland, 2001. — P. 1257–1264.
8. **Мержиевский Л. А., Урушкин В.** Особенности взаимодействия высокоскоростных частиц с экраном при ударе под углом // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 5. — С. 81–87.
9. **Johnson G. R., Cook W. H.** A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. 7th Intern. Symp. on Ballistic, The Netherlands, 1983. — P. 541–547.
10. **Johnson G. R., Holmquist T. J.** An improved computational constitutive model for brittle materials // High Pressure Science and Technology. — New York: AIP Press, 1994.
11. **The Science of Armour Materials** / I. G. Crouch (Ed.). — Elsevier, 2017. — (Woodhead Publ. in Mater.).
12. **Кобылкин И. Ф.** Пробивание двухслойных преград с внешним керамическим слоем и оптимизация их структуры // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 4. — С. 126–133.
13. **James B.** Practical issues in ceramic armor design // Ceram. Armor Mater. by Design. Ceram. Trans. — 2002. — V. 134. — P. 33–44.