

## ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОБИВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПРЕГРАД

И.Ф. Кобылкин  
А.А. Горбатенко

kobylkin\_ivan@mail.ru  
selenta92@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Представлена модель пробивания керамической преграды с образованием расширяющейся конической пробоины, позволяющая определить угол раствора выбиваемого из преграды конуса в зависимости от прочностных характеристик керамики и соотношения толщины керамического слоя и диаметра ударника. Показано, что основная причина такого разрушения состоит в существенно меньшей прочности керамики на растяжение по сравнению с прочностью на сжатие. С использованием энергетического критерия разрушения разработана методика расчета предельной скорости пробития керамической преграды. Двумерное численное моделирование процесса соударения стальных ударников с корундовыми пластинами показало удовлетворительное совпадение конфигурации образующихся конических трещин, полученной расчетным путем, с конфигурацией, наблюдаемой в экспериментах, при условии, что значения пределов прочности на сжатие и растяжение выбраны в соответствии с рекомендациями разработанной модели

### Ключевые слова

*Керамическая преграда, коническая трещина, пробитие, предельная скорость, энергетический критерий разрушения*

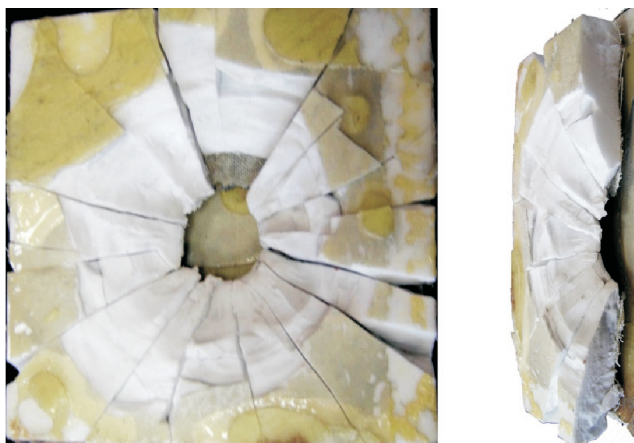
Поступила в редакцию 22.03.2016  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

---

**Введение.** Комбинированная броня, состоящая из лицевого керамического и тыльного энергоемкого металлического или композитного органопластикового слоев, является весьма эффективной защитой от действия бронебойных пуль, имеющих высокую проникающую способность. По существу, такая защитная структура в настоящее время является единственно возможной основой легкой индивидуальной и локальной бронезащиты высокого уровня. Высокая противопульная стойкость комбинированной брони с лицевым керамическим слоем обеспечивается наличием именно керамики, высокотвердого, но очень хрупкого материала. Особенности пробивания керамических слоев преград являются задержка проникания ударника в преграду и разрушение керамики в области воздействия в форме усеченного конуса, обращенного меньшим основанием к лицевой поверхности преграды, на которую действуют пули [1], что и обеспечивает их высокую противопульную стойкость. Диаметр основания конуса несколько превышает диаметр ударника, а угол раствора конуса изменяется в пределах  $2\alpha = 100 \dots 130^\circ$ .

В настоящей статье представлена феноменологическая модель пробивания керамической преграды, позволяющая объяснить такой характер разрушения керамики при пробитии и рассчитать угол раствора выбиваемого конуса и критическую скорость пробития в зависимости от прочностных характеристик керамики и соотношения толщины керамического слоя и диаметра ударника. Важность этих характеристик обусловлена тем, что в инженерных методиках расчета противоположной стойкости защитных структур с внешним керамическим слоем они являются входными параметрами, а при численном моделировании позволяют правильно выбирать прочностные характеристики керамики [1, 2].

**Взаимосвязь между прочностными характеристиками керамики и углом раствора конуса.** Пробивание керамических преград с образованием расширяющейся конической пробойны (рис. 1) существенно отличается от пробивания металлических преград с образованием цилиндрической пробки, диаметр которой примерно равен диаметру ударника [1, 2]. По мнению авторов, основной причиной такого различия является значительно меньшая прочность материала преграды на растяжение  $\sigma_r$  по сравнению с прочностью на сжатие  $\sigma_{сж}$ .



**Рис. 1.** Разрушение керамической пластины из  $Al_2O_3$  при воздействии бронебойной пули Б-32 калибром 7,62 мм на двухслойную керамическую органопластиковую броню (показана тыльная поверхность пластины)

Для удугохрупких материалов, к которым относится керамика, предел прочности на растяжение определяется редко. Вместо него обычно измеряется предел прочности на изгиб  $\sigma_{изг}$ , который, по существу, характеризует способность материала сопротивляться растяжению. Соответствующие осредненные данные, взятые из [1–4], приведены в табл. 1.

Согласно этим данным для керамик предел прочности на сжатие превышает предел прочности на растяжение (или при изгибе) в 10 и более раз. Значительное различие между прочностью керамики на растяжение и сжатие объясняют наличием микропор и микротрещин как внутри, так и на поверхности образца. При растяжении образца керамики на краях микротрещин возникают

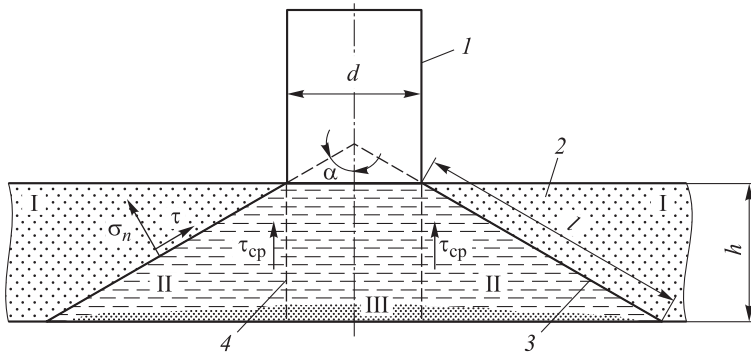
большие перенапряжения (эффект концентрации напряжений), которые и обуславливают распространение трещин и разрушение образцов при сравнительно небольших нагрузках. При сжатии сжимающие силы в отличие от растягивающих могут передаваться через существующие трещины, не приводя к концентрации напряжений [5].

Таблица 1

### Физико-механические характеристики некоторых керамик

Материал	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Модуль упругости $E$ , ГПа	Начальная твердость керамики	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Продольная скорость звука $c_k$ , км/с	Предел прочности, МПа, при		
						растяжении $\sigma_r$	сжатии $\sigma_{ск}$	изгибе $\sigma_{изг}$
Корунд $Al_2O_3$	3,9	407	HV 18,0 (HRA 90)	0,22	10,4	260	2000–3000	220 ± 20
Карбид бора $B_4C$	2,4...2,5	475	До HV 28 (HRA 96)	0,2	12,4	–	≥ 2500	420 ± 20
Карбид кремния $SiC$	3,0	350 ± 20	HV 20 (HRA 93)	0,17	10,5	–	≥ 2500	350 ± 20

Для определения взаимосвязи между прочностными характеристиками керамики и углом раствора конуса сравним силы, необходимые для выбивания из слоя керамики конической пробки и срезания цилиндрической пробки. Схема взаимодействия ударника диаметром  $d$  с керамической преградой толщиной  $h$  приведена на рис. 2. Сила  $F_{ср}$ , необходимая для срезания цилиндрической проб-



**Рис. 2.** Расположение конической и цилиндрической трещин при пробивании керамической преграды:

1 — ударник; 2 — керамическая преграда; 3 — коническая трещина отрыва; 4 — цилиндрическая трещина среза. I, III — области, в которых действуют растягивающие напряжения; II — область, в которой действуют сжимающие напряжения

ки высотой  $h$  и диаметром  $d$ , равна произведению сдвиговой прочности  $\tau_{ср}$  материала преграды на площадь боковой поверхности пробки:

$$F_{ср} = \tau_{ср} \pi d h . \quad (1)$$

На поверхности среза в условиях плоской деформации имеем

$$\tau_{ср} = \sigma_{сж} / \sqrt{3} \approx 0,58\sigma_{сж}.$$

Для вычисления силы  $F_{кон}$  отрыва материала преграды по конической поверхности разложим действующее на этой поверхности напряжение на нормальное  $\sigma_n$  и сдвиговое  $\tau$  (см. рис. 2). Тогда

$$F = (\sigma_n \sin \alpha + \tau \cos \alpha) S_{кон},$$

где  $S_{кон}$  — площадь конической трещины, представляющей собой усеченный конус.

Основные геометрические характеристики этого конуса следующие:  $r = d/2$  — радиус верхнего основания;  $R = d/2 + h \operatorname{tg} \alpha$  — радиус нижнего основания;  $l = h / \operatorname{tg} \alpha$  — длина образующей;  $S_{кон} = \pi l (R + r)$  — площадь боковой поверхности.

Считаем, что в предельных условиях на поверхности конической трещины нормальное напряжение отрыва  $\sigma_n$  достигает предела прочности на растяжение  $\sigma_p$ , а касательное — предела прочности на сдвиг при одноосном растяжении  $\tau = \sigma_p / 2$ . Окончательно выражение для силы отрыва приобретает следующий вид:

$$F_{кон} = \frac{\pi d h}{\cos \alpha} \left( 1 + \frac{h}{d} \operatorname{tg} \alpha \right) \left( \sigma_p \sin \alpha + \frac{\sigma_p}{2} \cos \alpha \right). \quad (2)$$

Характер разрушения преграды при ее пробивании будет зависеть от соотношения сил  $F_{ср}$  и  $F_{кон}$ . Если  $F_{ср} < F_{кон}$ , то преграда чаще всего пробивается по механизму срезания и последующего выбивания цилиндрической пробки. При  $F_{ср} \geq F_{кон}$  пробитие преграды происходит с разрушением преграды в конической области и последующим выбиванием разрушенного материала. Максимальный угол раствора  $\alpha$  выбиваемого из преграды конуса можно найти из уравнения  $F_{ср} = F_{кон}$ . Приравнивая правые части соотношений (1) и (2), получаем уравнение для определения  $\alpha$ :

$$\left( 1 + \frac{h}{d} \operatorname{tg} \alpha \right) \left( \sigma_p \sin \alpha + \frac{\sigma_p}{2} \cos \alpha \right) = 0,58\sigma_{сж} \cos \alpha.$$

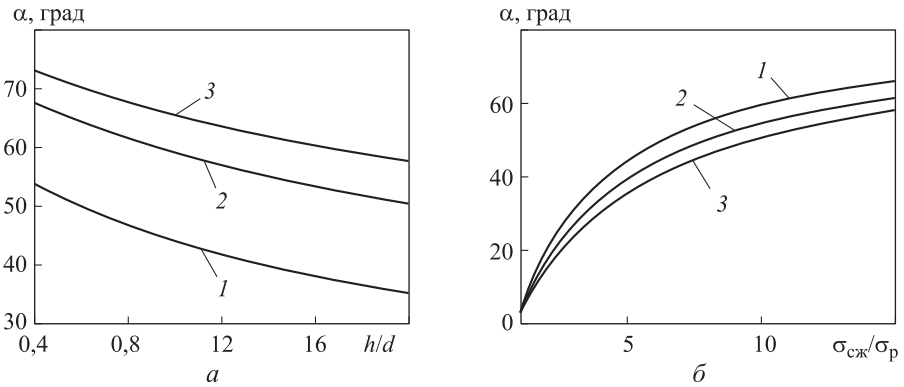
Поделив обе части этого уравнения на  $\cos \alpha$  и  $\sigma_p$ , получим квадратное уравнение относительно  $\operatorname{tg} \alpha$ :

$$\frac{h}{d} \operatorname{tg}^2 \alpha + \left( 1 + 0,5 \frac{h}{d} \right) \operatorname{tg} \alpha - \left( 0,58 \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} - 0,5 \right) = 0.$$

Корни этого уравнения могут быть определены по соотношению

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{2h} \left[ - \left( 1 + 0,5 \frac{h}{d} \right) \pm \sqrt{\left( 1 + 0,5 \frac{h}{d} \right)^2 + 4 \frac{h}{d} \left( 0,58 \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} - 0,5 \right)} \right]. \quad (3)$$

Физический смысл имеет корень со знаком + перед радикалом. Результаты расчетов по этой формуле приведены на рис. 3.



**Рис. 3.** Зависимости угла раствора выбиваемой из преграды конической области от относительной толщины преграды (*а*) и отношения предела прочности на сжатие к пределу прочности на растяжение (*б*):

$\sigma_{сж}/\sigma_p = 5; 10$  и  $15$  (кривые 1, 2 и 3 соответственно, *а*);  $h/d = 1; 1,5$  и  $2$  (кривые 1, 2 и 3 соответственно, *б*)

В диапазоне толщин преград  $h/d = 1 \dots 1,5$  значения углов раствора выбиваемого конуса заключены в диапазоне  $100^\circ \dots 130^\circ$  при отношении пределов прочности на сжатие и растяжение  $\sigma_{сж}/\sigma_p \geq 10$ , что соответствует известным экспериментальным данным [1, 2]. В соответствии с рассмотренным подходом угол раствора выбиваемой из преграды конической пробки зависит от относительной толщины преграды и отношения предела прочности на сжатие к пределу прочности на растяжение.

**Взаимосвязь критической скорости пробития преграды с характеристиками ударника и преграды.** Для определения критической скорости ударника, необходимой для пробития керамической преграды, будем исходить из следующих предположений и фактов.

1. Процесс пробития включает в себя некоторую временную задержку начала проникания  $t_p$  ударника в преграду [1, 2]. Считаем, что за это время происходит обмен импульсами и энергией между ударником и преградой и в преграде формируется разрушенная коническая пробка. Среднюю скорость  $v$ , приобретаемую разрушенной керамикой, можно определить, исходя из закона сохранения импульса:

$$v = v_0 \frac{m}{m + M}, \quad (4)$$

где  $v_0$  — начальная скорость ударника;  $m$  и  $M$  — массы ударника и выбиваемой конической пробки. При вычислении массы пробки предполагается, что плотность разрушенной керамики остается равной начальной плотности керамики  $\rho$ . Тогда

$$M = \rho V;$$

$$V = \frac{\pi h}{3} (R^2 + r^2 + Rr),$$

где  $V$  — объем конической пробки;  $r, R$  — радиусы верхнего и нижнего оснований разрушенного конуса.

2. Для разрушения керамики необходимо, чтобы в процессе взаимодействия с ударником каждая частица керамической пробки была бы деформирована до предельной разрушающей деформации  $\varepsilon_f$ . Для этого необходимо сообщить единице объема так называемую удельную (на единицу объема) энергию

разрушения  $A_f = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma_i d\varepsilon_i$ , где  $\sigma_i, \varepsilon_i$  — интенсивности истинных напряжений и

деформаций [6]. При высокоскоростном воздействии ударника энергия передается преграде в процессе ее многократного ударно-волнового сжатия и растяжения в волнах разрежения. Циркуляция волн сжатия и разрежения приводит к ускорению материала преграды до скорости  $v$ . Материал преграды будет разрушен, если плотность приобретенной кинетической энергии будет превышать удельную работу разрушения:

$$\frac{\rho v^2}{2} \geq A_f.$$

Минимальную скорость  $v$ , называемую критической  $v_{кр}$ , при превышении которой начинается разрушение, можно определить из равенства

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{2A_f}{\rho}}. \quad (5)$$

Подставляя  $v_{кр}$  в формулу (4), определяем значение предельной скорости ударника  $v_{п.с.п}$ , при превышении которой преграда будет пробита:

$$v_{п.с.п} = v_{кр} \left( 1 + \frac{M}{m} \right). \quad (6)$$

Оценить удельную работу разрушения керамики можно исходя из того, что она является упругохрупким материалом. Для одноосного сжатия

$$A_f = \frac{\sigma_{сж}^2}{2E}.$$

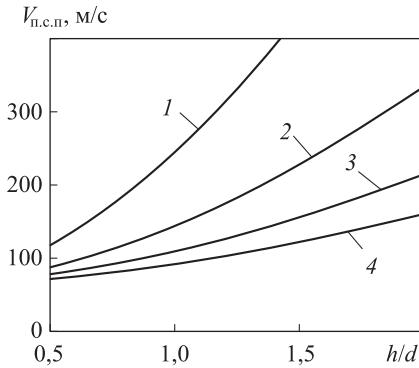
Подставляя это соотношение в (5), получаем выражение для  $v_{кр}$ :

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{\sigma_{сж}^2}{\rho E}}. \quad (7)$$

Поскольку скорость продольных упругих волн в керамике равна  $c = \sqrt{E/\rho}$ , то

$$v_{п.с.п} = \left(1 + \frac{M}{m}\right) \frac{\sigma_{сж}}{\rho c}.$$

Приведенные зависимости (3), (6) и (7) позволяют вычислить предельную скорость пробития керамических преград для различных соотношений их толщин и диаметров ударников. Результаты соответствующих расчетов для корундовой ( $Al_2O_3$ ) керамики приведены на рис. 4.



**Рис. 4.** Зависимости предельной скорости пробития керамических пластин от их относительной толщины для различных диаметров ударников  $d = 5; 7,5; 10$  и  $12,5$  мм (кривые 1–4 соответственно)

В расчетах зависимость массы ударника от его диаметра принималась в виде, характерном для пули  $m = 20 \cdot 10^3 d^3$  ( $m$  — в кг,  $d$  — в м) [7]. Кроме этого полагалось, что  $\sigma_{сж}/\sigma_p = 10$ . Вычисленное значение критической скорости для  $\sigma_{сж} = 2,5 \cdot 10^9$  Па составило  $v_{кр} = 62,75$  м/с. Для преград из корундовой керамики толщиной  $h = (1 \dots 1,5)d$  расчетная предельная скорость пробития ударниками диаметром  $7,5 \dots 12,5$  мм и длиной около  $3,3d$  изменяется в диапазоне  $v_{п.с.п} = 90 \dots 225$  м/с.

Несмотря на простоту рассмотренной модели, вычисленные значения предельной скорости пробития керамических пластин удовлетворительно согласуются с немногочисленными экспериментальными данными [8, 9]. Полученные результаты соответствуют известному экспериментальному факту, что без энергоемкой подложки керамическая преграда имеет невысокую стойкость к ударно-проникающему воздействию различных ударников.

Для подтверждения разработанной модели были проведены численные расчеты взаимодействия стальных ударников цилиндрической формы с керамическими пластинами в двумерной постановке с помощью программного пакета Ansys Autodyn [10].

Проведен ряд численных расчетов для разных толщин керамической пластины и ее материалов. Керамика задавалась с полиномиальным уравнением состояния и моделью деформирования и разрушения Джонсона — Холмквиста [11]. Материал ударника — сталь У12А с уравнениями состояния в форме Ми — Грюнайзена и упрочнения Джонсона — Кука [10]. В табл. 2 приведены кон-

станты модели Джонсона — Холмквиста, заложенные в программном комплексе Ansys Autodyn. Длина и диаметр ударника соотносились как 3,3:1. Для решения использовалась лагранжева сетка с размером ячеек для керамики  $0,1 \times 0,1$  мм и для ударника  $0,125 \times 0,125$  мм.

Таблица 2

Численные значения постоянных модели Джонсона — Холмквиста

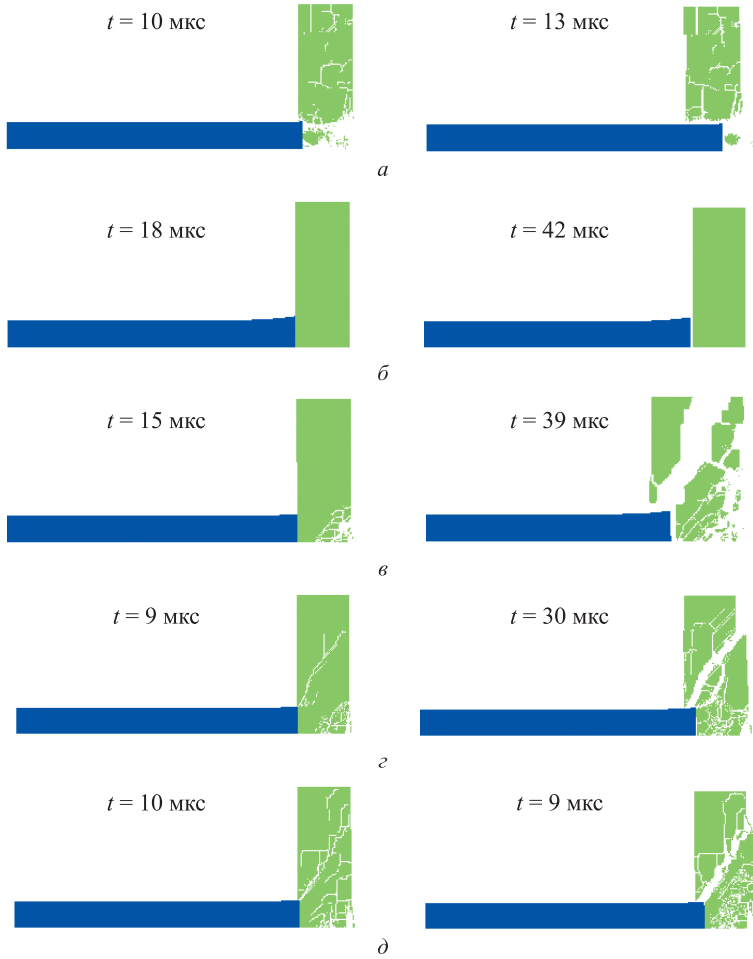
Постоянная	Тип керамики		
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , $\rho_0 = 3,89 \text{ г/см}^3$	SiC, $\rho_0 = 3,215 \text{ г/см}^3$	B <sub>4</sub> C, $\rho_0 = 2,516 \text{ г/см}^3$
Модуль объемного сжатия, ГПа	231	220	233
Модуль сдвига, ГПа	152	193,5	199
$\sigma_{HELE}$ , ГПа	6,53	11,7	12,5
$T$ , МПа	-262	-750	-7300
$A$	0,88	-	0,987
$B$	0,28	-	0,5
$C$	0,007	0,009	0,027
$M$	0,6	-	1,0
$N$	0,64	-	0,77
$D_1$	0,01	-	0,1
$D_2$	0,7	-	1,0
$\beta$	1,0	1,0	1,0
$S_1$ , ГПа	-	7,1	-
$P_1$ , ГПа	-	2,5	-
$S_2$ , ГПа	-	12,2	-
$P_2$ , ГПа	-	10,0	-

На рис. 5 показаны результаты численного моделирования для следующих геометрических параметров: диаметр ударника 7,5 мм, отношение толщины преграды и диаметра ударника  $h/d = 1:1$ .

При моделировании взаимодействий ударника с керамической преградой с данными из табл. 2 во всех случаях не образуется конической трещины, что не соответствует результатам экспериментов. Данное разногласие объясняется тем, что в табл. 2 заложены завышенные значения прочности керамики на сжатие и растяжение. Также на конфигурацию трещины керамики влияет значение коэффициента  $D_1$ . Значение этого коэффициента подбирается в зависимости от начальных условий (скорости ударника, формы головной части ударника и толщины преграды) таким образом, чтобы в керамике образовалась коническая пробоина с углом при вершине  $110^\circ \dots 130^\circ$ .

Проведены расчеты со значениями прочности керамики на растяжение (см. табл. 1), результаты показаны на рис. 5, з, д. Видно, что пробитие керами-





**Рис. 5.** Конфигурация трещин, возникающих при соударении стального ударника с керамическими пластинами (при  $v = 130$  (а, з);  $150$  (б, д);  $143$  м/с (в)): а, з — оксид алюминия, б, д — карбид бора, в — карбид кремния

ческих пластин происходит с образованием сетки трещин и конической трещины Герца [4]. Для отношения  $h/d = 1$  угол раствора конуса равен  $125^\circ$ . При увеличении толщины керамики до  $h/d = 1,5$  угол раствора конуса уменьшается до  $113^\circ$ . Полученная в расчетах конфигурация трещин удовлетворительно согласуется с наблюдаемой в экспериментах.

**Выводы.** Пробоитие преграды с образованием расширяющейся конической пробоины происходит вследствие существенно меньшей прочности керамики на растяжение по сравнению с прочностью на сжатие. В соответствии с рассмотренной моделью угол раствора выбиваемой из преграды конической пробки зависит от относительной толщины преграды и отношения пределов прочности на сжатие и растяжение. В диапазоне толщин преград  $h/d = 1 \dots 2$  при отношении пределов прочности на сжатие и растяжение  $\sigma_{сж}/\sigma_{р} \approx 10 \dots 12$  расчет-

ные значения углов раствора выбиваемого конуса изменяются в диапазоне  $100^\circ \dots 130^\circ$ , что соответствует экспериментальным данным.

С использованием энергетического критерия разрушения керамики разработан методика расчета предельной скорости пробития керамической преграды. Для преград из корундовой керамики толщиной  $(1 \dots 1,5)d$  расчетная предельная скорость пробития ударниками диаметром  $7,5 \dots 12,5$  мм и длиной около  $3,3d$  составляет  $90 \dots 225$  м/с, что соответствует известным экспериментальным данным. Без энергоемкой подложки керамическая преграда имеет невысокую стойкость к ударно-проникающему воздействию. Двумерное численное моделирование с помощью программы Ansys Autodyn процесса соударения стальных ударников с керамическими пластинами показало удовлетворительное соответствие получаемой в расчете конфигурации образующихся конических трещин с наблюдаемой в экспериментах при условии выбора соотношения между пределами прочности на сжатие и на растяжение в соответствии с рекомендациями разработанной модели.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Материалы и структуры легкой бронезащиты. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 191 с.
2. Rosenberg Z., Dekel E. Terminal ballistic. Berlin: Springer-Verlag, 2012. 323 p.
3. Легкие баллистические материалы / под ред. А. Бхатнагара, пер. с англ. под ред. С.Л. Баженова. М.: Техносфера, 2011. 392 с.
4. Григорян В.А., Белобородько А.Н., Кобылкин И.Ф., Дорохов Н.С. Частные вопросы конечной баллистики / под ред. В.А. Григоряна. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 592 с.
5. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
6. Физика взрыва / под ред. Л.П. Орленко. В 2 т. Т. 2. М.: Физматлит, 2002. 656 с.
7. Данилин Г.А., Огородников В.П., Заволокин А.Б. Основы проектирования патронов к стрелковому оружию. СПб.: Балт. ГТУ, 2005. 374 с.
8. Wilkins M.L. Computer simulation of penetration phenomena. Ballistic materials and penetration mechanics. Elsevier, 1980. P. 225–252.
9. Hazel P.J. Armour. Material, theory and design. Boca Raton: CRC Press, 2016. 395 p.
10. Autodyn™. Interactive non-linear analysis software. Theory Manual. Century Dynamics inc., 1998. 244 p.
11. Johnson C.R., Holmquist T.J. An improved computational constitutive model for brittle materials // Joint AIRA/APS Conference «High Pressure Science and Technology». Colorado Springs, 1993.

**Кобылкин Иван Федорович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Горбатенко Анастасия Анатольевна** — аспирантка кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Кобылкин И.Ф., Горбатенко А.А. Феноменологическая модель пробивания керамических преград // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 6. С. 62–73. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-6-62-73

**PHENOMENOLOGICAL MODEL OF PERFORATION CERAMIC PLATES**

**I.F. Kobylkin**  
**A.A. Gorbatenko**

kobylkin\_ivan@mail.ru  
selenta92@mail.ru

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

**Abstract**

The research proposes a model of perforation the ceramic plates with the widening taper breach. The model allows us to determine the taper angle, that depends on the strength characteristics of ceramics and the ratio of the ceramic layer thickness and the diameter of the firing pin. The study showed that the main reason for such type of ceramic fracture is considerably lower ceramics tensile strength compared to its compressive strength. By using energetic fracture criterion, we developed a method for calculating the limit velocity for penetrating the ceramic target. Two-dimensional numerical simulation of the steel firing pins impact on corundum targets showed a satisfactory agreement between the calculated and experimentally obtained taper cracks configurations. This agreement takes place only if the compressive strength and tensile strength limit values are chosen in accordance with the developed model recommendations

**Keywords**

*Ceramic target, conical crack, penetration, limit velocity, energetic fracture criterion*

**REFERENCES**

- [1] Kobylkin I.F., Selivanov V.V. Materialy i struktury legkoy bronezashchity [Light armor materials and structures]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 191 p.
- [2] Rosenberg Z., Dekel E. Terminal ballistic. Berlin, Springer-Verlag, 2012. 323 p.
- [3] Bhatnagar A., ed. Lightweight ballistic composites. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd., 2006. 429 p. (Russ. ed.: Legkie ballisticheskie materialy. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011. 392 p.).
- [4] Grigoryan V.A., Beloborod'ko A.N., Kobylkin I.F., Dorokhov N.S. Chastnye voprosy konechnoy ballistiki [Private final ballistics questions]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 592 p.
- [5] Cherepanov G.P. Mekhanika khрупkogo razrusheniya [Mechanics of brittle fracture]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 640 p.
- [6] Orlenko L.P., ed. Fizika vzryva. T. 2 [Explosion physics. Vol. 2]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 656 p.
- [7] Danilin G.A., Ogorodnikov V.P., Zavolokin A.B. Osnovy proektirovaniya patronov k strelkovomu oruzhiyu [Basics of designing cartridges for small arms]. Sankt-Petersburg, Balt. GTU Publ., 2005. 374 p.

- [8] Wilkins M.L. Computer simulation of penetration phenomena. Ballistic materials and penetration mechanics. Elsevier, 1980. P. 225–252.
- [9] Hazel P.J. Armour. Material, theory and design. Boca Raton: CRC Press, 2016. 395 p.
- [10] Autodyn T.M. Interactive non-linear analysis software. Theory Manual. Century Dynamics inc., 1998. 244 p.
- [11] Johnson C.R., Holmquist T.J. An improved computational constitutive model for brittle materials. *Joint AIRA/APS Conference «High Pressure Science and Technology»*, Colorado Springs, 1993.

**Kobytkin I.F.** — Dr. Sci. (Eng.), Professor of High-Precision Aircraft Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Gorbatenko A.A.** — post-graduate student of High-Precision Aircraft Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Kobytkin I.F., Gorbatenko A.A. Phenomenological Model of Perforation Ceramic Plates. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 6, pp. 62–73.

DOI: 10.18698/0236-3941-2016-6-62-73



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие авторов  
**В.А. Одинцова, С.В. Ладова, Д.П. Левина**

**«Оружие и системы вооружения»**

В систематизированном виде изложены сведения об оружии и системах вооружения как объектах, обеспечивающих поражение целей с помощью различных боеприпасов. Приведен краткий обзор истории развития вооружения. Даны определения понятий «оружие», «комплекс вооружения», «система вооружения». Рассмотрены состав, структура, основные свойства и боекомплекты комплексов вооружения.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
+7 (499) 263-60-45  
press@bmstu.ru  
www.baumanpress.ru