

УДК 623.445+539.411.5

МЕХАНИКА ПРОБИВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПРЕГРАД

И. Ф. Кобылкин

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

Представлена модель пробивания керамической преграды с образованием расширяющейся конической пробоины, позволяющая определить угол раствора выбиваемого из преграды конуса. Основная причина такого разрушения керамики состоит в существенно меньшей прочности керамики на растяжение по сравнению с прочностью на сжатие. С использованием энергетического критерия разрушения керамики разработана методика расчета предельной скорости пробивания керамической преграды без подложки. Двумерное численное моделирование процесса соударения стального ударника с корундовой пластиной показало удовлетворительное согласие получаемой в расчете конфигурации образующейся конической трещины с наблюдаемой в экспериментах при условии, что соотношение между пределами прочности на сжатие и на растяжение соответствует рекомендациям разработанной модели.

Ключевые слова: керамическая преграда, коническая трещина, пробитие, предельная скорость, энергетический критерий разрушения.

DOI 10.15372/FGV20170115

ВВЕДЕНИЕ

Керамика широко используется в качестве внешних слоев в комбинированных многослойных преградах для защиты от бронебойных пуль, обладающих высокой проникающей способностью. Особенностью пробития керамических слоев преграды является разрушение керамики в форме усеченного конуса, обращенного меньшим основанием к лицевой поверхности преграды, на которую воздействовал пуля [1] (рис. 1). Диаметр этого основания несколько превосходит диаметр ударника, а угол раствора конуса изменяется в пределах $2\alpha = 100 \div 130^\circ$. В статье представлена феноменологическая модель пробития керамической пластины, позволяющая объяснить такой характер разрушения керамики.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КЕРАМИКИ С УГЛОМ РАСТВОРА КОНУСА

Пробитие керамических преград существенно отличается от пробития металлических преград: в первом случае образуется расширяющаяся коническая пробоина, во втором — цилиндрическая пробка, диаметр которой примерно равен диаметру ударника [1, 2].

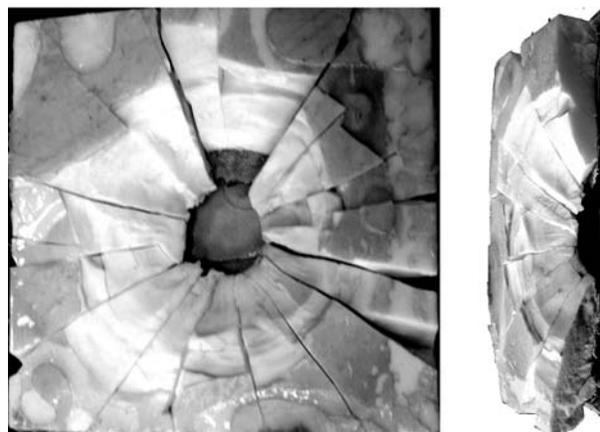


Рис. 1. Разрушение керамической пластины из Al_2O_3 при воздействии бронебойной пули Б-32 калибром 7.62 мм на двухслойную керамику-органопластиковую броню (показана тыльная поверхность пластины)

По нашему мнению, основной причиной такого различия является значительно меньшая прочность материала преграды на растяжение σ_p по сравнению с прочностью на сжатие $\sigma_{сж}$. Предел прочности на растяжение хрупких материалов, к которым относится керамика, определяется редко. Вместо него обычно измеряется предел прочности на изгиб, который, по существу, характеризует способность материала сопротивляться растяжению. Соответ-

Физико-механические характеристики некоторых керамик

Материал	ρ , г/см ³	E , ГПа	Начальная твердость		μ	c , км/с	σ_p , МПа	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{изг}$, МПа
			HV (по Виккерсу)	HRA (по Роквеллу)					
Корунд Al ₂ O ₃	3.9	407	18	90	0.22	10.4	260	2 000 ÷ 3 000	220 ± 20
Карбид бора B ₄ C	2.4 ÷ 2.5	475	28	96	0.2	12.4	—	≥ 3 000	420 ± 20
Карбид кремния SiC	3.0	350 ± 20	20	93	0.17	10.5	—	≥ 2 500	350 ± 20

Примечание. ρ — плотность, E — модуль упругости, μ — коэффициент Пуассона, c — продольная скорость звука, $\sigma_{изг}$ — предел прочности при изгибе.

ствующие осредненные данные, взятые из книг [1–4], приведены в таблице. Видно, что предел прочности на сжатие керамик превосходит предел прочности на растяжение (или при изгибе) в десять и более раз.

Значительное различие прочности керамики на растяжение и на 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 усилия, в отличие от растягивающих, могут передаваться через существующие трещины, не приводя к концентрации напряжений [5].

Для определения взаимосвязи между прочностными характеристиками керамики и углом раствора конуса сравним усилия, необходимые для выбивания из слоя керамики конической пробки и для срезания цилиндрической пробки. Схема взаимодействия ударника диаметром d с керамической преградой толщиной h представлена на рис. 2.

Усилие $F_{ср}$, необходимое для срезания цилиндрической пробки высотой h и диаметром d , равно 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 $\tau_{ср} = \sigma_{сж} / \sqrt{3} \approx 0.58 \sigma_{сж}$.

Для вычисления усилия $F_{кон}$, затрачиваемого на отрыв материала преграды по конической поверхности, разложим действующее на

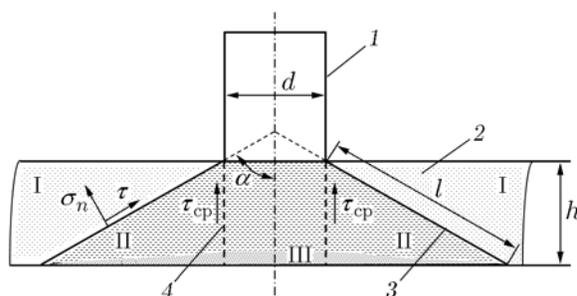


Рис. 2. Расположение конической и цилиндрической трещин при пробивании керамической преграды:

1 — ударник, 2 — керамическая преграда, 3 — коническая трещина отрыва, 4 — цилиндрическая трещина среза; I, III — области действия растягивающих напряжений, II — области действия сжимающих напряжений

этой поверхности напряжение на нормальное σ_n и сдвиговое $\tau_{сдв}$ (см. рис. 2). Тогда

$$F_{кон} = (\sigma_n \sin \alpha + \tau_{сдв} \cos \alpha) S_{кон}.$$

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 трещины, представляющей собой усеченный конус.

Будем считать, что в предельных условиях на поверхности конической трещины нормальное напряжение отрыва σ_n достигает предела прочности на растяжение σ_p , а касательное — предела прочности на сдвиг при одноосном растяжении $\tau_{сдв} = \sigma_p / 2$. Окончательно соотношение для вычисления усилия отрыва приобретает следующий вид:

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

Характер разрушения преграды при ее пробивании зависит от соотношения усилий $F_{\text{ср}}$ и $F_{\text{кон}}$. При $F_{\text{ср}} < F_{\text{кон}}$ преграда чаще всего пробивается по механизму срезания и последующего выбивания цилиндрической пробки. При $F_{\text{ср}} \geq F_{\text{кон}}$ происходит разрушение преграды в конической области с последующим выбиванием разрушенного материала. Максимальный угол раствора α выбиваемого из преграды конуса можно найти из уравнения $F_{\text{ср}} = F_{\text{кон}}$. Приравняв правые части соотношений (1) и (2), запишем уравнение для определения α :

$$\left(1 + \frac{h}{d} \operatorname{tg} \alpha\right) \left(\sigma_p \sin \alpha + \frac{\sigma_p}{2} \cos \alpha\right) = 0.58 \sigma_{\text{сж}} \cos \alpha.$$

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

$$\frac{h}{d} \operatorname{tg}^2 \alpha + \left(1 + 0.5 \frac{h}{d}\right) \operatorname{tg} \alpha - \left(0.58 \frac{\sigma_{\text{сж}}}{\sigma_p} - 0.5\right) = 0.$$

Корни этого уравнения могут быть определены с помощью соотношения

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{2h} \left[- \left(1 + 0.5 \frac{h}{d}\right) \pm \sqrt{\left(1 + 0.5 \frac{h}{d}\right)^2 + 4 \frac{h}{d} \left(0.58 \frac{\sigma_{\text{сж}}}{\sigma_p} - 0.5\right)} \right]. \quad (3)$$

Физический смысл имеет корень со знаком + перед радикалом. Результаты расчетов по этой формуле представлены на рис. 3. В диапазоне толщин преград $h/d = 1 \div 1.5$ угол раствора выбиваемого конуса находится в диапазоне $100 \div 130^\circ$ при отношении пределов прочности на сжатие и растяжение $\sigma_{\text{сж}}/\sigma_p \geq 10$, 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 $\sigma_{\text{сж}}/\sigma_p$.

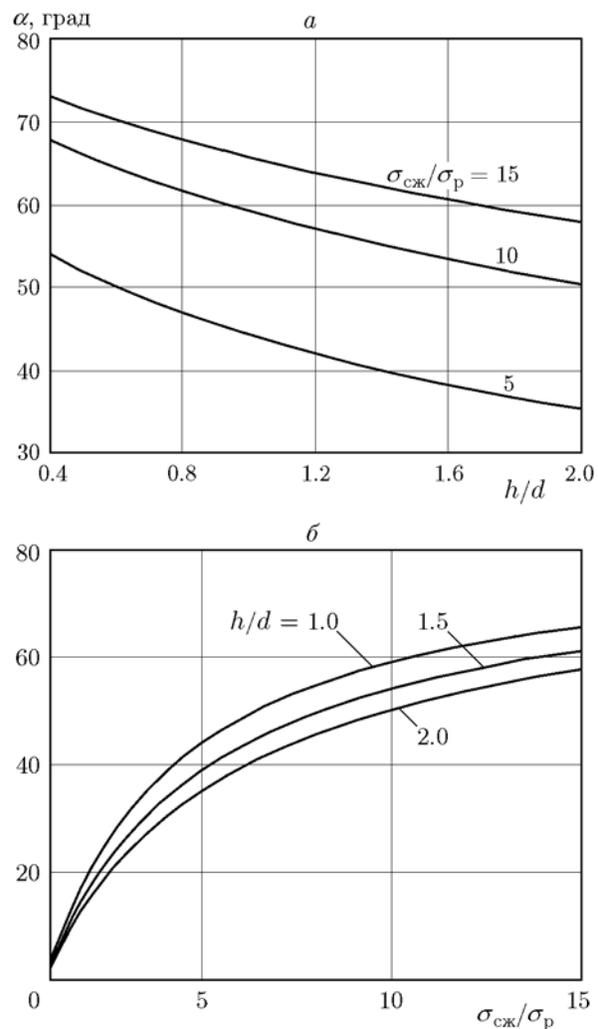


Рис. 3. Зависимости угла раствора выбиваемой из преграды конической области от относительной толщины преграды (а) и от отношения предела прочности на сжатие к пределу прочности на растяжение (б)

ВЗАИМОСВЯЗЬ КРИТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ПРОБИВАНИЯ ПРЕГРАДЫ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ УДАРНИКА И ПРЕГРАДЫ

Для определения критической скорости ударника, необходимой для пробивания керамической преграды, будем исходить из следующих предположений и фактов.

1. Процесс пробивания включает в себя некоторую временную задержку начала проникания ударника в преграду [1, 2]. Будем считать, что за это время происходит обмен импульсами и энергией между ударником и преградой и в преграде формируется разрушен-

ная 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 , M — массы соответственно ударника и выбиваемой конической пробки. При вычислении массы пробки предполагается, что плотность разрушенной керамики ρ остается равной ее начальной плотности ρ_0 . 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 для каждой частицы керамической пробки достигалась предельная разрушающая деформация ε_f . Для этого надо сообщить единице объема так называемую удельную (на единицу объема) энергию разрушения, равную $A_f = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma_i d\varepsilon_i$, где σ_i , ε_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 превзойдет удельную работу разрушения:

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

Минимальную скорость v , при превышении которой начинается разрушение, можно определить из равенства

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

Подставляя $v_{кр}$ в формулу (4), находим значение предельной скорости ударника $v_{пр}$, при превышении которой преграда будет пробита:

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

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

$$A_f = \frac{\sigma_{сж}^2}{2E}.$$

Подставив это соотношение в (5), получаем выражение

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

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

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

Зависимости (3), (6) и (7) позволяют вычислить предельную скорость пробивания керамических преград при различных соотношениях их толщин и различных диаметрах ударников. Результаты соответствующих расчетов для корундовой (Al_2O_3) керамики приведены на рис. 4. В расчетах зависимость массы ударника от его диаметра принималась в

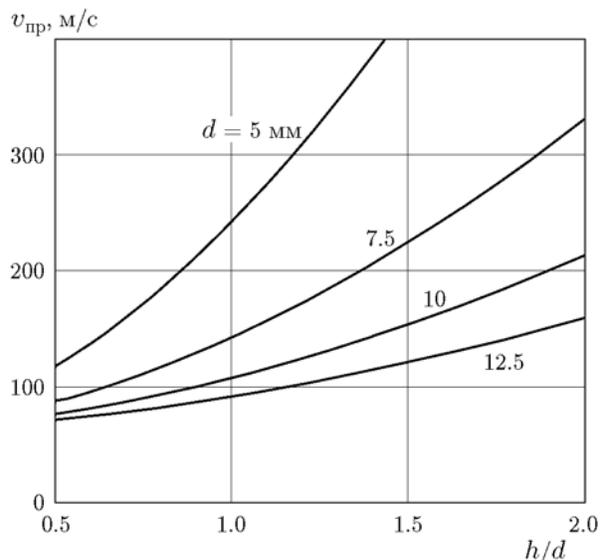


Рис. 4. Зависимость предельной скорости пробивания керамических пластин от их относительной толщины при использовании ударников различных диаметров

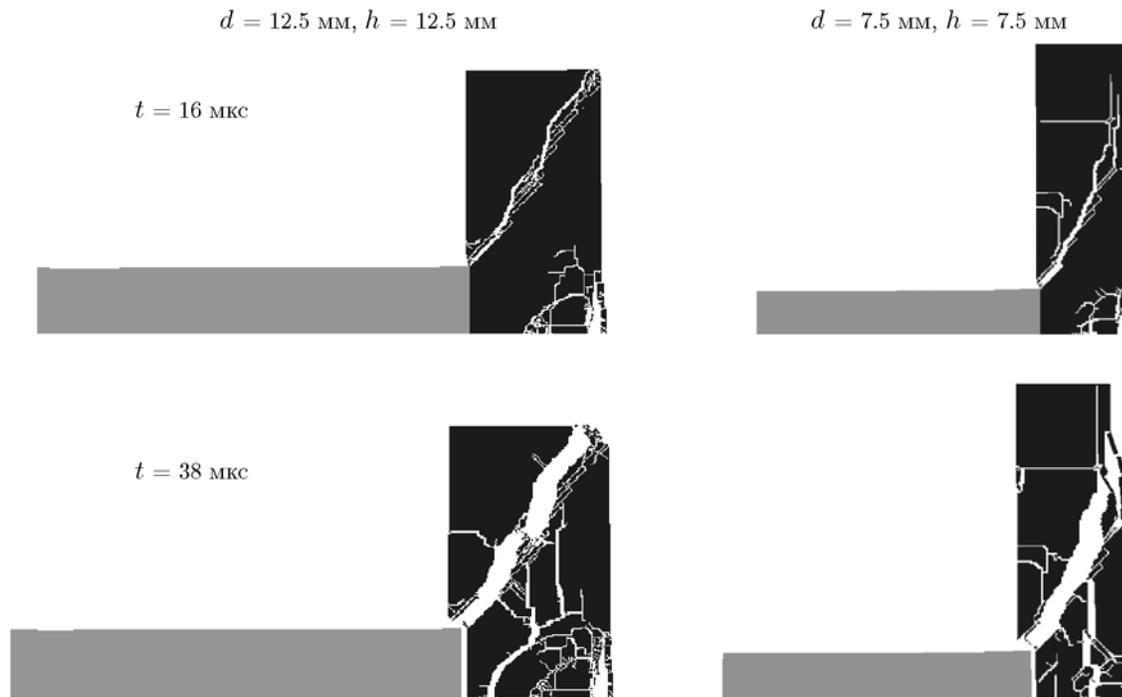


Рис. 5. Конфигурация трещин, возникающих при соударении стальных ударников с керамическими пластинами из корунда:

скорость соударения 120 м/с, время отсчитывается от момента соударения

виде, характерном для пуль: $m = 20 \cdot 10^3 d^3$ (m — [кг], d — [м]) [7]. Кроме этого, полагалось, что $\sigma_{сж}/\sigma_p = 10$. Вычисленное при $\sigma_{сж} = 2.5 \cdot 10^9$ Па значение критической скорости составило $v_{кр} = 62.75$ м/с. Для преграда из корундовой керамики толщиной $h = (1 \div 1.5)d$ расчетная предельная скорость пробивания ударниками диаметром $7.5 \div 12.5$ мм и длиной около $3.3d$ изменяется в диапазоне $v_{пр} = 90 \div 225$ м/с.

Несмотря на простоту рассмотренной модели, вычисленные значения предельной скорости пробивания керамических пластин удовлетворительно согласуются с немногочисленными данными экспериментов [8, 9]. Полученные результаты соответствуют известному экспериментальному факту, заключающемуся в том, что без энергоемкой подложки керамическая преграда обладает невысокой стойкостью к ударно-проникающему воздействию различных ударников.

Для подтверждения разработанной модели были проведены численные расчеты взаимодействия стальных ударников цилиндрической формы с керамическими пластинами в двумер-

ной постановке при помощи программного пакета ANSYS Autodyn [9].

Материал пластины — корунд с полиномиальным уравнением состояния и моделью деформирования и разрушения Джонсона — Холмквиста [10]. Материал ударника — сталь У12А с уравнениями состояния Ми — Грюнайзена и Джонсона — Кука [11]. Модели Джонсона — Холмквиста и Джонсона — Кука интегрированы в программу ANSYS Autodyn. Длина и диаметр ударника взяты в соотношении 3.3 : 1. Отношение пределов прочности на сжатие и растяжение для керамики выбрано не из библиотеки уравнений состояния, а в соответствии с рекомендациями разработанной модели и составило $\sigma_{сж}/\sigma_p = 11.45$.

Результаты расчетов (рис. 5) показали, что пробитие керамических пластин сопровождается образованием сетки трещин и конической трещины Герца [5]. При $h/d = 1$ угол раствора конуса равен 120° , при увеличении толщины керамики до $h/d = 1.5$ угол уменьшается до 100° . Полученная в расчетах конфигурация трещин удовлетворительно согласуется с наблюдаемой в экспериментах.

ВЫВОДЫ

1. Пробитие 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 предела прочности на сжатие к пределу прочности на растяжение. В диапазоне толщин преград $h/d = 1 \div 2$ при отношении пределов прочности на сжатие и растяжение $\sigma_{сж}/\sigma_{р} \approx 10 \div 12$ расчетные значения углов раствора выбиваемого конуса изменяются в диапазоне $100 \div 130^\circ$, что соответствует экспериментальным данным.

2. С использованием энергетического критерия разрушения керамики разработана методика расчета предельной скорости пробивания керамической преграды. Для преград из корундовой керамики толщиной $(1 \div 1.5)d$ расчетная предельная скорость пробития ударниками диаметром $7.5 \div 12.5$ мм и длиной $\approx 3.3d$ составила $90 \div 225$ м/с, что соответствует известным экспериментальным данным. Без энергоемкой подложки керамическая преграда обладает невысокой стойкостью к ударно-проникающему воздействию.

3. Двумерное численное моделирование с помощью программы ANSYS Autodyn процесса соударения стальных ударников с корундовыми пластинами показало удовлетворительное согласие 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.

Автор выражает благодарность А. А. Горбатенко за помощь в проведении численных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кобылкин И. Ф., Селиванов В. В.** Материалы и структуры легкой бронезащиты. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
2. **Rosenberg Z., Dekel E.** Terminal Ballistic. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
3. **Легкие баллистические материалы** / под ред. А. Бхатнагара: пер. с англ. под ред. С. Л. Баженова. — М.: Техносфера, 2011.
4. **Частные вопросы конечной баллистики** / В. А. Григорян, А. Н. Белобородько, И. Ф. Кобылкин и др. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
5. **Черепанов Г. П.** Механика хрупкого разрушения. — М.: Наука, 1974.
6. **Физика взрыва: в 2 т.** / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2002. — Т. 2.
7. **Данилин Г. А., Огородников В. П., Заволокин А. Б.** Основы проектирования патронов к стрелковому оружию. — СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2005.
8. **Wilkins M. L.** Computer simulation of penetration phenomena // Ballistic Materials and Penetration Mechanics / R. C. Laible (Ed.). — Amsterdam; Oxford; New York: Elsevier Scient. Publ. Co., 1980.
9. **Hazel P. J.** Armour. Material, Theory and Design. — London; New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.
10. **Johnson C. R., Holmquist T. J.** An improved computational constitutive model for brittle materials // Joint AIRA/APS Conf. «High Pressure Science and Technology». — Colorado Springs, 1993.
11. **AutodynTM.** Interactive Non-Linear Analysis Software. Theory Manual. — Century Dynamics Inc., 1998.

Поступила в редакцию 10/III 2016 г.