

## Особенности математического моделирования разрушения керамических пластин под воздействием высокоскоростных ударников

© А.В. Петюков, К.А. Грин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва

*Рассмотрены вопросы математического моделирования пробития керамических бронепанелей высокоскоростными цилиндрическими ударниками. С использованием программного комплекса LS-DYNA разработана соответствующая методика численного моделирования: выбран метод моделирования, подобраны размеры расчетных ячеек, значения числа Куранта, а также значения линейных и квадратичных коэффициентов псевдовязкости. Путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными показано, что лагранжевы и эйлеровы численные методики, в отличие от метода SPH (метода сглаженных частиц), неудовлетворительно воспроизводят процесс расщепления ударной волны на упругий предвестник и пластическую волну. Определены также характерные размеры выбиваемой из керамической преграды конической пробки, и показано влияние масштабного эффекта на качественную картину разрушения керамики: с увеличением толщины преграды увеличивается угол полураствора выбиваемого из материала конуса.*

**Ключевые слова:** керамическая преграда, численные методы, модель Джонсона — Холмквиста, коническая трещина, карбид бора, SPH-метод, упругий предвестник, пластическая волна

**Введение.** В большинстве современных средств индивидуальной бронезащиты от автоматных и винтовочных пуль используется керамика. Это обусловлено ее физико-механическими характеристиками. С одной стороны, низкие значения плотности ( $\rho = 2,4...3,9 \text{ г/см}^3$ ) позволяют уменьшить массу бронезиленета по сравнению со стальными бронепластинами, с другой стороны, высокие значения модуля упругости ( $E = 350...475 \text{ ГПа}$ ) и твердости керамики ( $10...30 \text{ ГПа}$ ) обеспечивают баллистическую стойкость против высокоэнергетических средств поражения [1–5]. В то же время остаются недостаточно изученными практически важные механизмы взаимодействия пуль стрелкового оружия с керамическими преградами [6, 7]. Как правило, для исследования баллистической стойкости материалов применяют экспериментальные методики [8–10]. При всех очевидных преимуществах таких способов они обладают существенным недостатком: высокой стоимостью и трудоемкостью. Следует отметить, что при большом числе варьируемых параметров не всегда удается установить их взаимосвязь с результатом испытаний (пробитием или непробитием преграды). Для снижения затрат на разработку новых изделий необходимо использовать возможности современного

компьютерного моделирования высокоскоростных динамических процессов.

Целью данной работы является разработка расчетной методики для оценки параметров разрушения высокопрочной керамики при ее пробитии цилиндрическими ударниками.

**Поиск и валидация метода моделирования.** В основу методики оценки закладывался программный комплекс LS-DYNA, а также несколько различных расчетных методов, интегрированных в него: SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics — метод сглаженных частиц), ALE-2D и лагранжев метод Уилкинса [11]. Все эти методы опираются на систему уравнений, которая описывает законы сохранения массы, импульса и энергии в дифференциальной форме и дополнена соотношениями для девиатора напряжений, замыкающими соотношениями (уравнениями состояния и моделями прочности), а также начальными и граничными условиями для каждой конкретной задачи.

Важнейший этап при разработке расчетной методики — тестирование на соответствие математической модели реальному физическому процессу. Для этого была проведена серия расчетов по численному моделированию экспериментов, описанных в работе [12]: ударники из различных материалов разгонялись ствольной установкой до скоростей  $v_{уд} = 300 \dots 4000$  м/с и соударялись с зафиксированным в пространстве образцом карбида бора  $B_4C$  (рис. 1). Скорость  $v$  тыльной поверхности образца определялась с помощью интерферометра VISAR через окно из фторида лития LiF или полиметилметакрилата (PMMA). За ударником также располагалась подложка, изготовленная из полиуретановой пены PU различной плотности в экспериментах № 1–8, из тантала Ta в эксперименте № 9 и из PMMA в эксперименте № 10. Дополнительная информация об экспериментах № 1–10 приведена в табл. 1.

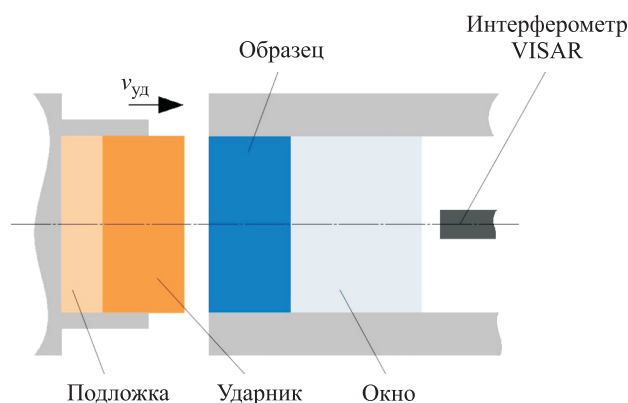


Рис. 1. Схема эксперимента

Дополнительная информация об экспериментах № 1–10

Номер эксперимента	Плотность материала подложки $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Материал		Скорость ударника $v_{уд}$ , м/с
		ударника	окна	
1	320	B <sub>4</sub> C	LiF	1546
2	640	B <sub>4</sub> C	LiF	2210
3	320	B <sub>4</sub> C	PMMA	370
4	320	B <sub>4</sub> C	LiF	1633
5	640	B <sub>4</sub> C	LiF	2076
6	160	PMMA	PMMA	913
7	640	Ta	LiF	2059
8	160	PMMA	PMMA	1162
9	16 660	LiF	LiF	2320
10	1186	B <sub>4</sub> C	LiF	3980

Расчеты проводились в осесимметричной двумерной постановке. Для обеспечения устойчивости численных расчетов число Куранта выбрано равным 0,2. Для сквозного расчета ударных волн (без их явного выделения на расчетной сетке) использовалась комбинированная псевдовязкость, характеризующаяся линейным  $q_1$  и квадратичным  $q_2$  коэффициентами [13].

Сжимаемость некерамических материалов моделировалась с помощью уравнения состояния (УРС) Ми — Грюнайзена в форме

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{3}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E, \quad (1)$$

где  $\rho_0$ ,  $\rho$  — начальное и текущее значения плотности материала соответственно;  $C$  — угловой коэффициент кривой сжатия;  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$  [11];

$\gamma_0$  — коэффициент Грюнайзена;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $a$  — эмпирические параметры УРС.

Значения констант для УРС LiF и Ta были взяты из работ [14, 15], а для УРС стали У12А, PU и PMMA подбирались по экспериментальным данным [16–19].