

0.5

От карбида бора до стекла: поглощение удлинённого высокоскоростного ударника в хрупких материалах

© Б.В. Румянцев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: brum@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 29 апреля 2016 г.

Исследовано внедрение в карбид бора удлинённого высокоскоростного ударника в виде медной струи, сформированной взрывом кумулятивного заряда. Проведено сравнение эффективности поглощения кумулятивной струи в различных хрупких материалах для оценки их защитных возможностей. Определены условия отсутствия влияния боковой волны разгрузки на зону внедрения ударника, обеспечивающие минимальную глубину проникания.

В ряду промышленных керамик карбид бора имеет максимальные прочностные показатели при малой плотности, что определяет перспективность применения его в защите от высокоскоростного удара. В то же время стоимость изделий из карбида бора выше, чем у других промышленных керамик. Необходимо установить сравнительную оценку различных хрупких материалов (ХМ) для определения затрат по защите от высокоскоростного удара удлинённого ударника. В таблице приведены свойства ряда промышленных высококомодульных ХМ.

В работе исследована струегасящая способность карбида бора в комбинации со сталью, взятой в виде эталона, при действии кумулятивного заряда (КЗ) I (рис. 1) с медной воронкой с углом при вершине 60° , с размером по основанию воронки $d = 20$ mm и массой ВВ (гексоген флегматизированный) 40 g. Условия действия кумулятивного заряда — статическое расположение по нормали к преграде, через фокусное расстояние $F = 60$ mm. При детонации заряда формируется медная струя с градиентом скорости от 6.5 до 1.5 km/s, которая внедряется в стальную преграду средней твердости на глубину 104 mm (КЗ без линзы) и на глубину 118 mm (КЗ с линзой). Комбинированная

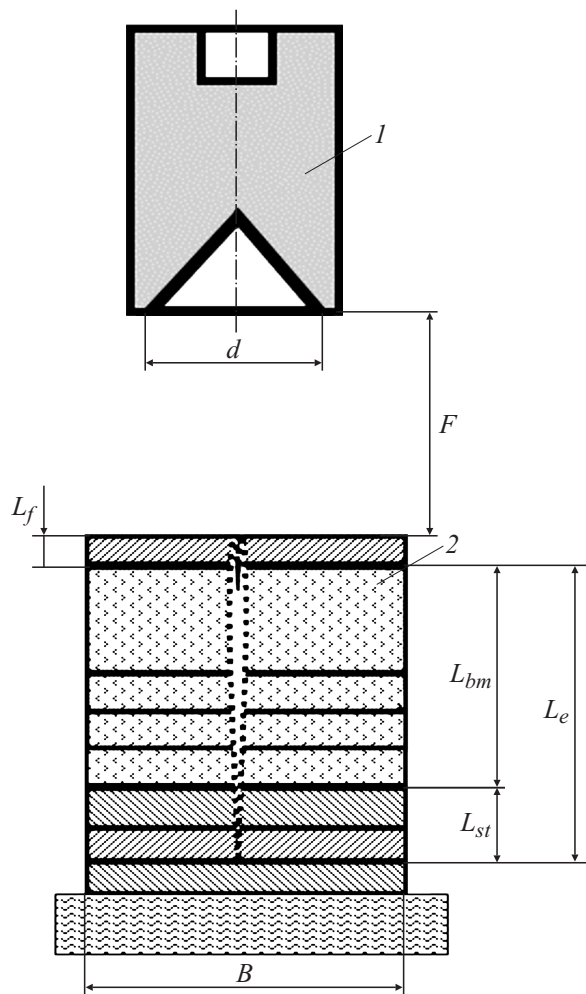


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — кумулятивный заряд, 2 — комбинированная преграда. L_f , L_{st} — лицевой и тыльный слой стали, L_{bm} — слой ХМ, L_e — конечная глубина пробития, d — диаметр воронки кумулятивного заряда, B — поперечный размер преграды.

Свойства исследованных ХМ

Наименование, размер пластин материала, mm	Плотность, $\text{kg/m}^3 \cdot 10^{-3}$	Скорость упругих волн, km/s		Твердость, GPA	Предел прочности, GPA		Коэффициент замещения стали, K_{ef}
		Cl	Сt		к	на	
Горячепрессованный карбид бора (Вириал) 90 × 90 × 7.5, 100 × 100 × 18	2.52	14	8.8	30	0.42–0.44	2.0	3.4
Реакционноспеченный карбид кремния (Вириал) 100 × 100 × 15	3.05	11.5	?	23–30	0.28	–	3.1
Карбид кремния С-2 80 × 80 × 20	2.98	11.1	6.8	17	0.15	1.2	2.4
Корунд КВП98 100 × 100 × 12	3.88	10.3	7.4	19	0.19	2.2	2.7
Ситалл СТЛ-10 80 × 80 × 30	2.45	6.3	3.7	10	0.3	1.3	2.9
Стекло PG 80 × 80 × 10	2.5	5.9	3.6	5.5	0.15	0.75	2.5
Гранит*	2.7	–	–	–	0.06	–	0.8
Бетон*	2.1	–	–	–	0.04	–	0.6
Песок*	1.5	–	–	–	0	–	0.4

* — из данных по пробитию неограниченной среды.

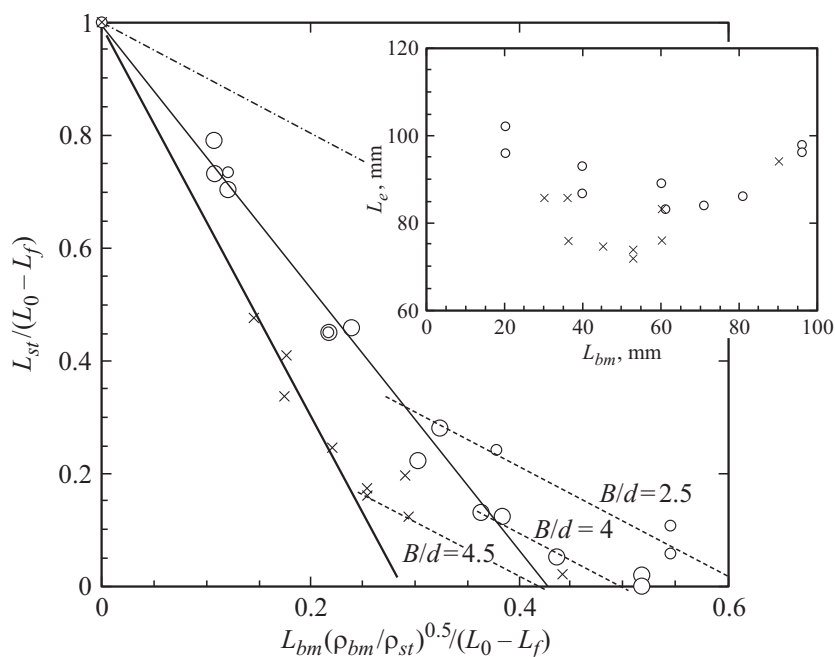


Рис. 2. Остаточное пробитие стального тыла в зависимости от толщины слоя ХМ: \circ — для стекла (размер точки соответствует величине B/d); \times — для карбида бора в приведенных координатах (на врезке — исходные результаты определения глубины пробития комбинированной преграды). Сплошные линии — участки эффективного поглощения КС (тонкая в стекле, толстая — в карбиде бора). Пунктирные линии — поглощение в области разгрузки, штрихпунктирная линия — гидродинамический эквивалент замещения стали ХМ.

преграда 2 состояла из слоев керамики L_{bm} и тыльного слоя стали L_{st} , фиксирующего конечную глубину пробития.

На врезке рис. 2 приведены результаты по определению глубины пробития комбинированной преграды ХМ — сталь при различной толщине слоя карбида бора или стекла. Видно, что применение ХМ позволяет защитить от высокоскоростного ударника при меньшей толщине комбинированной преграды, чем сплошная сталь, а кар-

бид бора, естественно, лучше стекла. Причем наибольшее снижение толщины комбинированной преграды наблюдается при определенном слое ХМ. Аналогичный качественный результат воспроизводится и для других ХМ [1].

Исследования кинетики внедрения кумулятивной струи (КС) в различные высокомодульные ХМ [1–3] показали, что повышенное прочностное сопротивление внедрению не может объяснить эффективного снижения толщины комбинированной преграды при замене стали, являющейся базовым материалом защиты, на ХМ. Внедрение головных элементов высокоскоростной струи в преграду инициирует схлопывание стенок каверны, которое в случае металлов останавливается из-за наличия вязкости. В ХМ в зоне внедрения реализуется откол и откольные массы воздействуют на проходящие элементы КС. Преодоление области взаимодействия струи и материала каверны приводит к вторичному расходу и дестабилизации дальнейшего внедрения. Радиальное взаимодействие каверны со струей является отличительным признаком внедрения в высокомодульные хрупкие материалы и определяет их повышенную струегасящую способность.

Очевидно, чем больше прочностные характеристики ХМ, тем больше прочностное сопротивление внедрению КС, тем больше скорость схлопывания откольных фрагментов каверны, быстрее и сильнее будет взаимодействие со струей. В то же время откольная прочность не может быть рекомендована в качестве критерия отбора ХМ для защиты от удлиненного высокоскоростного ударника ввиду сложности получения достоверных значений даже в условиях одномерного нагружения [4]. Рекомендуемое в [3] определение времени задержки схлопывания каверны достаточно трудоемко и требует материальных затрат.

Для выявления факторов, определяющих струегасящую способность ХМ, необходим общий, достаточно простой подход для систематизирования экспериментальных результатов по различным ХМ и кумулятивным зарядам.

Из сравнения расхода одинаковой КС по стали и комбинированной преграде (рис. 1) можно получить оценку эффективности ХМ по замещению тыльного слоя стали при действии КС [5]:

$$L_{st}/(L_0 - L_f) = 1 - K_{ef}(\rho_{bm}/\rho_{st})^{0.5}L_{bm}/(L_0 - L_f),$$

где ρ_{bm} и ρ_{st} — плотности ХМ и стали соответственно; K_{ef} — коэффициент отличия расхода струи от гидродинамического соотношения

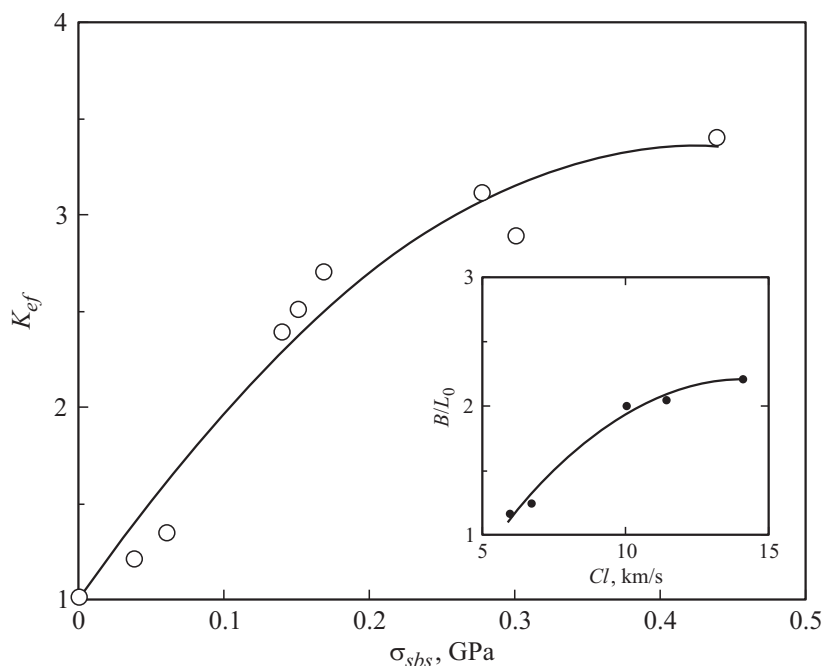


Рис. 3. Зависимость коэффициента эффективности стругашения ХМ от предела прочности на изгиб (по данным таблицы). На врезке — зависимость поперечного размера пластины ХМ, обеспечивающего полное стругашение, от скорости волны разгрузки.

плотностей; L_0 , $L_e = L_f + L_{bm} + L_{st}$ — глубины пробития однородной стальной преграды и составной преграды со слоем ХМ; L_f — толщина лицевого слоя стали, в случае его применения.

Из уравнения следует, что толщина остаточного слоя стали линейно зависит от толщины слоя хрупкого материала. На рис. 2 результаты пробития комбинированной преграды показаны в приведенных координатах согласно уравнению. Результаты по остальным ХМ аналогичны и отражены в [1,5]. Видно, что до определенной толщины ХМ экспериментальные результаты можно описать уравнением с коэффициентом эффективности $K_{ef} > 1$ по замещению стали (см. таблицу).

По результатам определения K_{ef} струегашения различных ХМ построена зависимость от предела прочности на изгиб (рис. 3), которая наиболее адекватно описывает экспериментальные результаты. Значения для гранита, бетона и песка взяты из [6]. Предел прочности на изгиб является основной характеристикой прочности ХМ наряду с прочностью на сжатие и твердостью. Схема нагружения при определении прочности к изгибу в какой-то степени аналогична условиям деформирования материала в зоне внедрения, что предопределило выбор характеристики для сравнения.

Высокие прочностные характеристики карбида бора проявляются в наибольшем коэффициенте струегашения по сравнению со стеклом, карбидом кремния и корундом. Высокие показатели ситалла, также отмеченные в [3,7], по-видимому, определяются сочетанием кристаллической (наполнитель — корунд) и аморфной (связующее — стекло) фаз и требуют дополнительного анализа.

Эффективное струегашение нарушается при больших толщинах ХМ вследствие влияния боковой волны разгрузки. При увеличении толщины ХМ замещение начинает идти в соответствии с гидродинамическим соотношением плотностей (пунктирные линии параллельны штрихпунктирной линии, построенной при $K_{ef} = 1$) и общий габарит преграды начинает увеличиваться (рис. 2). Это связано с тем, что с определенного момента боковая волна разгрузки распространяется по ХМ перед зоной внедрения. После опережения области внедрения КС волной разгрузки от боковой свободной поверхности ХМ начинается процесс разрушения материала, нагруженного в волне сжатия, распространяющейся с начала внедрения. Материал теряет прочность, последующее внедрение в него идет без дестабилизации, в гидродинамическом струйном режиме. На врезке рис. 3 приведена оценка [7] достаточного поперечного размера B изделий из ХМ, при котором реализуется полное струегашение в минимальной толщине и массе преграды. Видно, что высокопрочные керамики с высокой скоростью звука обеспечивают полное струегашение при $B/L_0 \sim 2$, литевые ХМ — стекло и ситалл при $B/L_0 \sim 1$.

Таким образом, появилась возможность оценки толщины и массы защиты из высокопрочных ХМ при действии разных геометрически подобных кумулятивных зарядов с уровнем пробития по стали L_0 . Вместо стали в качестве базового материала защиты может быть взят, например, стеклотекстолит с соответствующим уровнем пробития.

Следует отметить, что вышеопределенная эффективность высококомодульных хрупких материалов характерна для защиты от медной КС, сформированной с помощью энергии взрывчатых веществ. Длительность процесса дестабилизации КС, инициированного радиальным действием каверны в ХМ, объясняется способностью разогретой меди к фазовым переходам в условиях высокоскоростного соударения [8].

Список литературы

- [1] Румянцев Б.В. // ФТТ. 2011. Т. 53. В. 10. С. 2018–2022.
- [2] Kozhushko A.A., Kozachuk A.I., Romyantsev B.V., Sinani A.B. // Int. J. Impact Eng. 2003. N 29. P. 385–390.
- [3] Григорян В.А., Белобородько А.Н., Дорохов Н.С. и др. Частные вопросы конечной баллистики. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. С. 592.
- [4] Савиных А.С., Гаркушин Г.В., Разоренов С.В., Румянцев В.И. // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 6. С. 77–82.
- [5] Румянцев Б.В. // Труды Междунар. конф. „VII Харитоновские тематические научные чтения“. РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров, 2005. С. 625.
- [6] Щербаков Б.Ф., Румянцев Б.В. Противотанковые ракетные комплексы. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2010. С. 101.
- [7] Румянцев Б.В. // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. 2015. В. 11–12. С. 73–78.
- [8] Romyantsev B.V., Klimenko V.Yu. // 2011 AIP Conf. Proc. 1426. 56–59. (2012); doi: 10.1063/1.3686220 © 2012 American Institute of Physics 978-0-7354-1006-0/\$0.00