

**МЕХАНИЗМ ПРОЯВЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУЕЙ**

Румянцев Б.В.

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия.
brum@mail.ioffe.ru*

Известно, что внедрение кумулятивной струи (КС) в хрупкие материалы (керамики, стекла, горные породы) осложняется взаимодействием с каверной [1, 2]. Вместе с плотностью прочность хрупких материалов (ХМ) влияет на сопротивление внедрению, диаметр каверны и окончание проникания. Однако, основным фактором, определяющим поглощение КС в ХМ, является схлопывание откольных масс каверны за область внедрения. Квазистационарное проникание КС нарушается [1]. Следствием является значительное снижение глубины пробития. Экспериментальная траектория внедрения КС в ХМ состоит из начального гидродинамического внедрения, «приостановки» и возобновления внедрения возмущенной КС. Т.о. на траектории внедрения с некоторой задержкой отражается инициирование радиальной реакции ХМ на высокоскоростное внедрение. Время задержки характеризует скорость схлопывания каверны и степень повреждения КС. В [2] определение времени задержки предлагается для характеристики противокумулятивной стойкости ХМ. В тоже время, ясно, что время задержки определяет начальную фазу процесса внедрения и не может прогнозировать конечный результат пробития. Кинетика внедрения после гидродинамического участка отражает дестабилизированное состояние КС [1].

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

В работе [1] для оценки поглощения КС в ХМ была предложена зависимость, основанная на экспериментальном определении отклонения от ГДД – приближения внедрения в базовый материал (сталь).

Из сравнения расхода одинаковой КС по стали и комбинированной преграде из керамики и стали можно получить оценку эффективности действия хрупкого материала по замещению тыльного слоя стали:

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

где: ρ_{bm} и ρ_{st} - плотности хрупкого материала и стали, соответственно; K_{ef} - коэффициент отличия расхода струи от гидродинамического соотношения плотностей; $L_0, L_e = L_f + L_{bm} + L_{st}$ - глубины пробития однородной стальной преграды и составной преграды со слоем хрупкого материала L_{bm} ; L_f – толщина лицевого слоя стали, в случае его применения.

В данной работе результаты по исследованию поглощения КС в ряде ХМ (Таблица) обобщены по уравнению 1 и предложена единая характеристика для оценки эффективности ХМ.

В дополнение к результатам [1], исследована струегасящая способность карбида бора в комбинации со сталью, взятой в виде базового материала, при действии кумулятивного заряда (КЗ) с медной воронкой с углом при вершине 60° , с размером по основанию воронки $d = 20$ mm и массой ВВ 40 г. 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 преграда состояла из слоев керамики и тыльного слоя стали, фиксирующего конечную глубину пробития.

Таблица - Свойства исследованных промышленных ХМ

Наименование, размер пластин материала в мм	Плотность $\text{kg/m}^3 \cdot 10^{-3}$	Скорость упругих		Предел прочности GPa		K_{ef} замещения стали
		Cl	Ct	к изгибу	на сжатие	
Карбид бора (Вириал) 90x90x7.5, 100x100x18	2.52	14	8.8	0.42 – 0.44	2.0	3.6
Карбид кремния (Вириал) 100x100x15	3.05	11.5	7.0	0.28	-	3.1
Карбид кремния КМ-2 80x80x20	2.98	11.1	6.8	0.15	1.2	2.4
Корунд АЛ1 100x100x12	3.88	10.3	5.6	0.19	2.4	2.7
Ситалл СТЛ-10 80x80x30	2.45	6.3	3.7	0.3	1.3	3.4
Стекло PG 80x80x10	2.5	5.9	3.6	0.15	0.75	2.4

На вставке рис. 1 приведены глубины пробития комбинированной преграды хрупкий материал - сталь при различной толщине слоя карбида бора или стекла. Видно, что применение хрупких материалов позволяет поглотить КС при меньшей толщине комбинированной преграды, чем сплошная сталь, а карбид бора, естественно, лучше стекла. Причем наибольшее снижение толщины комбинированной преграды наблюдается при определенном слое хрупкого материала. Аналогичный качественный результат воспроизводится и для других ХМ [1].

Из уравнения следует, что толщина остаточного слой стали линейно зависит от толщины слоя хрупкого материала (рис. 1). Видно, что до определенной толщины хрупкого материала экспериментальные результаты можно описать уравнением с коэффициентом эффективности $K_{\text{ef}} > 1$ (см. таблицу).

По результатам определения K_{ef} струегашения различных хрупких материалов построена зависимость от предела прочности на изгиб σ_{sbs} (statistical bending strength), (рис. 2), которая наиболее адекватно описывает экспериментальные результаты. Предел прочности на изгиб является основной характеристикой 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 [1,2], требуют дополнительного анализа.

Эффективное струегашение нарушается при больших толщинах хрупкого материала, вследствие влияния боковой волны разгрузки. При увеличении толщины хрупкого материала, замещение начинает идти в соответствии с гидродинамическим соотношением плотностей (пунктирные линии параллельны штрихпунктирной линии, построенной при $K_{\text{ef}} = 1$) и общий габарит преграды начинает увеличиваться. Это связано с тем, что с определенного момента боковая волна разгрузки

распространяется по хрупкому материалу перед зоной внедрения. После опережения области внедрения кумулятивной струи волной разгрузки от боковой свободной поверхности ХМ начинается процесс разрушения материала, нагруженного в волне сжатия, распространяющейся с начала внедрения. Материал теряет прочность, последующее внедрение дестабилизированной КС соответствует гидродинамическому поглощению. При достаточных поперечных размерах **B** изделий из ХМ реализуется полное струегашение в минимальной толщине и массе преграды (вставка на рис. 2). Высокопрочные керамики с высокой скоростью звука обеспечивают полное струегашение при $B/L_0 \sim 2$, литьевые ХМ - стекло и ситалл при $B/L_0 \sim 1$.

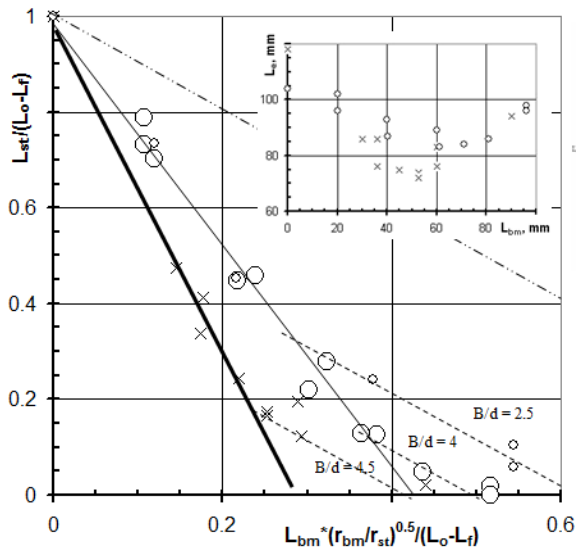


Рисунок 1 - Остаточное пробитие стального тыла в зависимости от толщины слоя хрупкого материала с поперечным размером **B** в приведенных координатах : (o) – для стекла (размер точки отражает размер B); (x) – для карбида бора. Сплошные линии – участки эффективного поглощения КС (тонкая в стекле, толстая – в карбиде бора). Пунктирные линии – поглощение в области разгрузки, штрихпунктирная линия – гидродинамический эквивалент замещения стали хрупким материалом. Вставка - изменение глубины пробития комбинированной преграды в зависимости от толщины хрупкого материала.

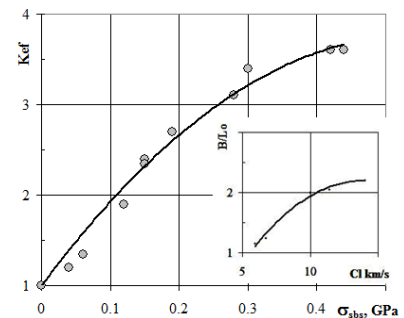


Рисунок 2- Зависимость коэффициента эффективности струегашения хрупких материалов от предела прочности на изгиб (по данным таблицы). На вставке приведена зависимость поперечного размера пластины хрупкого материала, обеспечивающего полное струегашение, от скорости звука ХМ.

Т.о. появилась возможность оценки максимальных возможностей защиты из высокопрочных хрупких материалов при действии геометрически подобных кумулятивных зарядов с уровнем пробития по стали **L₀**. Вместо стали, в качестве базового материала защиты может быть взят, например, стеклотекстолит с соответствующим уровнем пробития.

Литература

1. Б.В. Румянцев. ФТТ, 2011, Т. 53, В. 10. С. 2018-2022.
2. Частные вопросы конечной баллистики / В.А. Григорян, А.Н. Белобородько, Н.С. Дорохов и др.; Под ред. В.А. В.А. Григоряна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. С. 592.