

05

## Особенности коллективного внедрения кумулятивных струй в хрупкие материалы

© Б.В. Румянцев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail:brum@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 1 июля 2014 г.)

Исследовано групповое действие кумулятивных струй по комбинации корунда и стеклотекстолита. Показано, что при определенных геометрических и временных соотношениях коллективное действие кумулятивных струй усиливает эффективность противодействия хрупкого материала высокоскоростному внедрению. Указанные особенности проявляются при дозвуковом характере внедрения и подтверждают механизм радиального действия каверны в высокопрочном хрупком материале на внедряющуюся кумулятивную струю.

Освоение космического пространства, Луны, Марса сопровождается экспоненциальным ростом количества техногенного мусора, представляющего собой твердые тела массой более 1 г, плотностью 1–9 г/см<sup>3</sup> с соотношением размеров существенно больше 1 и скоростью от 8–11 км/с в околоземном пространстве до 1.6–2.4 км/с в окололунном пространстве. Кроме того, техногенный мусор по своей природе возникновения имеет групповой характер воздействия. Защита космических объектов, ориентированная в настоящее время на защиту от микрометеоритов, в будущем должна учитывать возрастающую вероятность поражения от техногенного мусора. Например, представления о надежной защите транспортных средств, предназначенных для передвижения по поверхности Луны и Марса, могут базироваться на принципах, разработанных для защиты военной бронированной техники от поражения кумулятивной струей (КС).

Многие практические задачи, например групповое простреливание нефтяных скважин, горные разработки, разрушение бетонных конструкций и т. д., связаны с многократным применением взрывных устройств, особенности группового действия которых рассматривались в работах [1–3]. Основной вывод достаточно тривиален — многократное действие превышает действие одиночного взрывного устройства.

Качественно другой результат можно получить при групповом действии кумулятивных зарядов по высокомодульным хрупким материалам, который можно использовать для повышения защиты от высокоскоростного удара.

При проектировании защиты транспортных средств на Луне и Марсе предлагается использовать представления о сверхскоростном внедрении в конденсированную среду КС, формируемой при детонации кумулятивного заряда взрывчатого вещества с металлической облицовкой. Новизна баллистического сценария заключается в групповом характере воздействия кумулятивных струй и применении легких и доступных материалов защиты:

аналогов базальтовых пород вулканогенного происхождения — керамики, стеклоподобных материалов.

Основные исследования в области высокоскоростного внедрения в прочные хрупкие материалы были направлены на выяснение влияния высокой прочности материала защиты на поглощение ударников. В настоящее время известно, что прочностное сопротивление в гидродинамической теории движения струи в прочной среде не может объяснить всех особенностей кинетики высокоскоростного внедрения [4]. Анализ кинетики внедрения КС в высокомодульные хрупкие материалы — керамики и стекла — позволил выяснить определяющую роль радиального действия каверны в преграде на дестабилизацию элементов струи [5]. Высокая прочность хрупких материалов обеспечивает быстрое схлопывание каверны и приводит к нарушению гидродинамического характера внедрения КС [6]. На рис. 1 приведены экспериментальные результаты по пробитию различными кумулятивными зарядами тыльного стального слоя комбинированной преграды в зависимости от толщины слоя корунда. Результаты нормированы на соответствующее пробитие по стали геометрически подобными кумулятивными зарядами с различным диаметром кумулятивной воронки —  $K$ . Видно, что эффективность действия керамики по поглощению КС гораздо выше гидродинамического эквивалента замещения (двойная линия), вытекающего из соотношения плотностей М.А. Лаврентьева для пробития различных материалов.

Из сравнения расхода КС по стали и комбинированной преграде можно получить количественную оценку эффективности действия керамики по поглощению КС:

$$\frac{L_e - L_{cor}}{L_o - L_f} = 1 - K_{eff}(\rho_{cor}/\rho_{st})^{0.5} L_{cor}/(L_o - L_f), \quad (1)$$

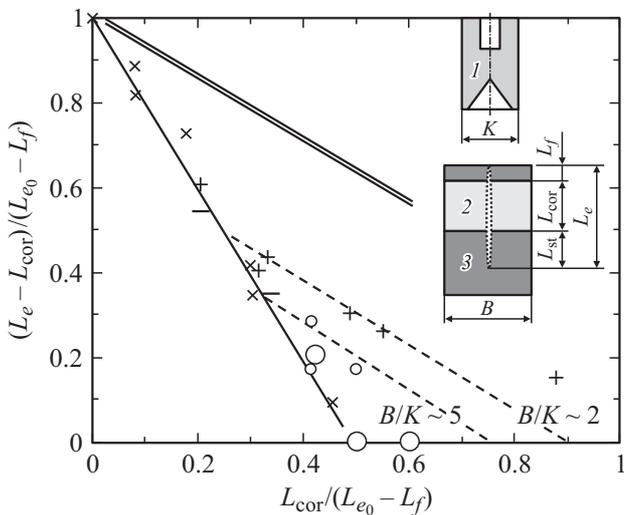
где  $\rho_{cor}$  и  $\rho_{st}$  — плотности хрупкого материала и стали соответственно,  $K_{eff}$  — коэффициент отличия от гидродинамического соотношения плотностей,  $L_o$ ,  $L_e$  — глубина пробития однородной стальной преграды и составной преграды со слоем корунда  $L_{cor}$  кумулятивной струей от заряда с диаметром кумулятивной воронки  $K$ ,

$L_f$  — толщина лицевого слоя стали в случае его применения.

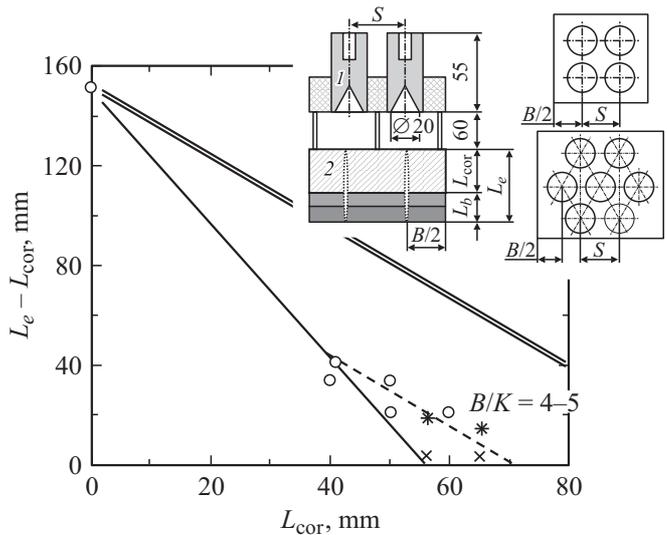
Из рис. 1 видно, что при замещении стального тыла на слой корунда пробитие тыльного слоя изменяется по уравнению (1) с  $K_{eff} = 2.7$ . Значение  $K_{eff} > 1$  свидетельствует о повышенной струегасящей способности корунда.

Внедрение в высокопрочные хрупкие материалы идет в дозвуковом режиме — ударная волна сжатия уходит от области внедрения. Через некоторое время с начала внедрения радиальная волна разгрузки со свободных поверхностей керамического элемента ( $B$  — поперечный размер элемента) опережает область внедрения и разрушает сжатый материал преграды, лишая его возможности воздействовать на струю. Поэтому повышенная эффективность керамики соблюдается до определенной толщины керамики, после чего боковая волна разгрузки ослабляет радиальное схлопывание стенок каверны и в дальнейшем наблюдается гидродинамический эквивалент (пунктирная линия). В этом проявляется влияние поперечных размеров преграды на внедрение. При достаточно больших поперечных размерах керамической пластины  $B/K > 8$  внедрение заканчивается раньше прихода боковой волны разгрузки и наблюдается полное поглощение КС в хрупком материале.

Как видно из рис. 1, эффективность хрупких материалов по поглощению КС не зависит от размера КС



**Рис. 1.** Обобщенная картина пробития кумулятивным зарядом 1 преграды из корунда 2 ( $L_{cor}$ ) и стали 3 ( $L_{st}$ ). Диаметр воронки кумулятивного заряда  $K = 20$  (○), 45 (×) [7], 61 мм (+).  $L_e$  — глубина пробития комбинированной преграды,  $L_{cer}$  — толщина слоя керамики,  $L_f$  — толщина стального лицевого слоя (если есть),  $L_{e0}$  — глубина внедрения в сталь.  $B$  — поперечный размер пластин корунда. Сплошная линия — толщина стального тыльного слоя в зависимости от слоя керамики, штриховая линия — поглощение в области разгрузки, двойная линия — гидродинамический эквивалент замещения стали керамикой.



**Рис. 2.** Остаточное пробитие стеклотекстолита в зависимости от толщины слоя корунда: ○ — для одиночного кумулятивного заряда, × — средний минимальный результат для группы, \* — максимальное пробитие в группе. На врезке схема эксперимента: 1 — кумулятивный заряд, 2 — преграда из слоев корунда ( $L_{cor}$ ) и стеклотекстолита ( $L_b$ ),  $S$  — расстояние между центрами зарядов,  $B/2$  — минимальная полуширина керамического элемента для крайнего кумулятивного заряда. Остальное, как на рис. 1.

(сплошная линия) и лучше стали, основного материала тыльного слоя преграды.

Качественно картина сохраняется при замене основного конструктивного материала преграды, например, на дюралюминий, стеклотекстолит.

При групповом внедрении КС может иметь место взаимное влияние по ударной волне, так как режим внедрения дозвуковой. Последствия влияния боковой ударной волны на зону внедрения не ясны.

В связи с этим представляется актуальной оценка защитных возможностей хрупких материалов при действии группы кумулятивных струй, являющейся аналогом действия компактного „облака“ космического мусора.

Схема эксперимента по исследованию коллективного действия кумулятивных струй на керамику приведена на рис. 2. Кумулятивные заряды (КЗ) 1 из взрывчатого вещества массой 40 г с кумулятивной воронкой из меди толщиной 0.8 мм с полным углом при вершине 60° и диаметром в основании 20 мм располагались на расстоянии 60 мм от преграды из пластин корунда 2 плотностью 3.7 г/см<sup>3</sup>, микротвердостью  $Hv = 17$  ГПа. При детонации единичного заряда формируется медная струя с градиентом скоростей от 6.5 до 1.5 км/с. Для фиксирования конечной глубины пробития пластины корунда размещались на стеклотекстолите (СТТ) плотностью 1.85 г/см<sup>3</sup>. Группа кумулятивных зарядов состояла из 4 и 7 зарядов, причем в последней группе было организовано одновременное и разновременное

Характеристики преград и результаты эксперимента

Количество КЗ, разновременность, расстояние между КЗ— $S$	Состав и размеры преграды	$B/2$	Глубина пробития $L_e$	Вероятность проявления разгрузки
mm				
1 шт.	Стеклотекстолит $60 \times 60$	30	148, 150, 154, 145, 147 Ср. 148	—
4 шт., одновременное, 40 mm	Стеклотекстолит $120 \times 120$	40	162, 152, 162, 152, 149, 140 Ср. 153	—
1 шт.	Корунд $100 \times 100$ / СТТ $100 \times 100$ $L_{\text{cor}} = 50, L_b = 54$	50	84, 71, 77	—
4 шт., одновременное, 110 mm	Корунд $190 \times 190$ / СТТ $200 \times 200$ $L_{\text{cor}} = 65, L_b = 32$	55	70, 67, 66, 65, 66, 71, 72, <u>80</u>	1/8
7 шт., одновременное, 45 mm	Корунд $155 \times 170$ / СТТ $200 \times 200$ $L_{\text{cor}} = 56, L_b = 99$	42	62, 56, 60, 56, 56, <u>75, 76.5</u>	2/7
7 шт., одновременное, 35 mm		50	60, 64, 58, 56, <u>75, 75, 75</u>	3/7
7 шт., отставание по центру на $15 \mu\text{s}$ , 45 mm	Корунд $155 \times 170$ / СТТ $200 \times 200$ $L_{\text{cor}} = 56, L_b = 99$	42	58, 58, 57, 56, 56, <u>75</u> Отказ по центру	1/6
7 шт., опережение по центру на $15 \mu\text{s}$ , 45 mm		42	74 Разброс кумулятивных струй	—

действие кумулятивных струй. Данные по количеству кумулятивных зарядов, расстоянию между ними ( $S$ ), составу и размерам пластин преграды, минимальному расстоянию до свободной боковой поверхности ( $B/2$ ) и пробитию приведены в таблице.

На графике рис. 2 приведены результаты определения остаточной глубины пробития в стеклотекстолите после слоя корунда при одиночном действии кумулятивного заряда ( $\circ$ ) и групповом ( $\times$  и  $*$ ).

Из таблицы следует, что при одиночном и групповом действиях кумулятивных струй по однородной преграде из стеклотекстолита глубина внедрения одинакова.

Замена части стеклотекстолита на слой корунда ведет к уменьшению глубины пробития (сплошная линия) с  $K_{\text{eff}} \sim 1.9$ . При одиночном воздействии КС максимальная глубина пробития корунда составляла 55–80 mm в зависимости от поперечного размера пластин корунда  $B$ . При избыточных толщинах происходило разрушение всего корунда и повреждение стеклотекстолита отсутствовало.

Обращает на себя внимание, что при групповом действии наблюдается двойственный результат внедрения (см. таблицу). Минимальный результат (среднее значение отображено ( $\times$ ) на рис. 2), который демонстри-

рует почти полное поглощение КС уже при толщинах корундового слоя 56 mm, и максимальный (подчеркнут в таблице и представлен ( $*$ ) на рис. 2), который продолжает тенденцию снижения глубины пробития при действии одиночного заряда. Причем вероятность появления максимального результата увеличивается с уменьшением расстояния  $B/2$ .

Как видно из таблицы, групповое действие кумулятивных струй может способствовать радиальному схлопыванию в соседней каверне и (или) экранировать боковую волну разгрузки, создавая возможность для полного поглощения всей группы кумулятивных струй при малых размерах керамического элемента  $B/2 < 50$  mm. Минимальная вероятность проявления разгрузки достигается, когда в область схлопывания каверны приходят волны сжатия от зоны внедрения соседнего заряда.

Для дальнейших исследований взаимного влияния коллективного внедрения КС необходимо устранить влияние продуктов детонации кумулятивных зарядов, так как по этой причине при опережающем действии центрального кумулятивного заряда происходит разброс соседних струй и групповое внедрение нарушается (см. таблицу).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что групповое действие кумулятивных струй при определенных геометрических и временных соотношениях усиливает эффективность противодействия хрупкого материала высокоскоростному внедрению.

При проектировании защиты космических и планетных транспортных объектов от техногенного мусора и метеоритов целесообразно использовать комбинированную защиту с применением высокопрочных хрупких материалов и учетом возможных последствий коллективного действия ударников.

## Список литературы

- [1] *Murphy M.J., Baum D.W., Kuklo R.M., Simonson S.C.* Effect of multiple and delayed jet impact and penetration on concrete target borehole diameter. Lawrence Livermore National Laboratory. 7000EastAve. Livermore. CA 94551. USA. 2001.
- [2] *Лин Э.Э., Жабицкий С.К., Мельцас В.Ю., Михайлов А.Л., Новиков С.А., Стадник А.Л., Янилкин Ю.В.* // ПЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 2. С. 6–10.
- [3] *Зелепугин С.А., Зелепугин А.С.* // Химическая физика. 2008. Т. 27. № 3. С. 71–76.
- [4] *Румянцев Б.В.* // ФТТ. 2011. Т. 53. Вып. 10. С. 2018–2022.
- [5] *Румянцев Б.В.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 6. С. 28–32.
- [6] *Румянцев Б.В.* // Труды Междунар. конф. „VII Харитоновские тематические научные чтения“. РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров, 2005. С. 625.
- [7] *Hornemann U., Holzwarth A.* // Intern. J. Impact Engng. 1997. Vol. 20. P. 375–383.