

05

Групповое высокоскоростное внедрение в хрупкие материалы

© О.В. Базанов, А.С. Власов, С.А. Душенок, Б.В. Румянцев

СКТБ „Технолог“, Санкт-Петербург

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

E-mail:brum@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 27 сентября 2012 г.

Исследовано групповое действие кумулятивных струй по комбинации корунда и стелотекстолита. 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 кумулятивную струю.

Освоение космического пространства, Луны, Марса сопровождается экспоненциальным ростом количества техногенного мусора, представляющего собой твердые тела массой более 1 г, плотностью $1-9 \text{ g/cm}^3$ с соотношением размеров существенно больше 1 и скоростью от $8-11 \text{ km/s}$ в околоземном пространстве до $1.6-2.4 \text{ km/s}$ 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).

Для проектирования защиты 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 КС и требований к

материалам защиты: относительная легкость и локальная доступность (например, прочные аналоги лунных скальных пород — керамики, стекла).

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 [1]. Анализ кинетики внедрения КС в хрупкие материалы — керамики и стекла — позволил выяснить определяющую роль радиального действия каверны в преграде на дестабилизацию элементов струи [2]. Высокая прочность керамик обеспечивает быстрое схлопывание каверны и приводит к нарушению гидродинамического характера внедрения КС. На рис. 1 [3] приведены экспериментальные результаты по пробитию различными кумулятивными зарядами тыльного стального слоя комбинированной преграды в зависимости от слоя корунда. Результаты нормированы на пробитие по стали данным кумулятивным зарядом. 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. Повышенная эффективность керамики соблюдается при действии различных по масштабу геометрически подобных кумулятивных зарядов до определенной толщины керамики, когда боковая волна разгрузки ослабляет радиальное схлопывание стенок каверны и в дальнейшем наблюдается гидродинамический характер внедрения (пунктирная линия). Внедрение в высокопрочные хрупкие материалы идет в дозвуковом режиме, и волна разгрузки со свободных поверхностей керамического элемента через некоторое время опережает область внедрения и разрушает материал преграды, лишая его возможности воздействовать на струю. 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.

При групповом внедрении КС при дозвуковом режиме внедрения может иметь место взаимное влияние по ударной волне, последствия которого не ясны.

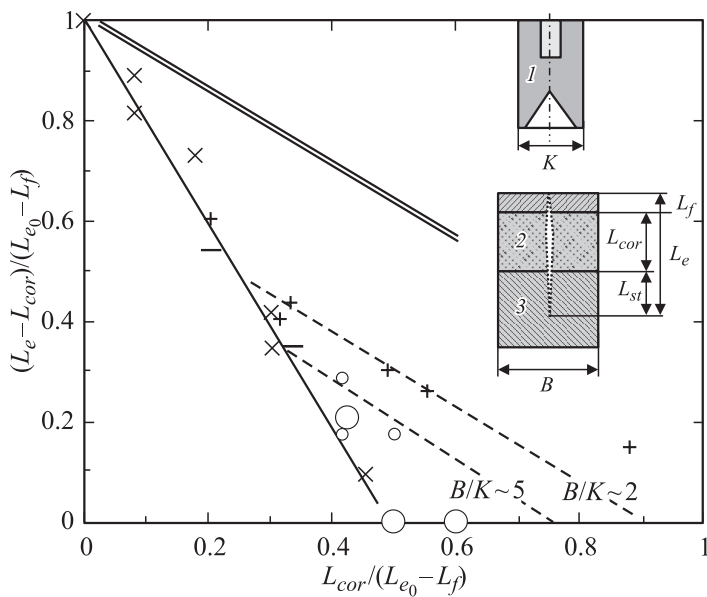


Рис. 1. Обобщенная картина пробития кумулятивным зарядом I преграды из листов корунда 2 и стали 3. Диаметр воронки кумулятивного заряда $K = 20$ mm (\circ); 45 mm (\times) [4]; 61 mm ($+$). Сплошная линия — эффективное поглощение КС, пунктирная линия — поглощение в области разгрузки, двойная линия — гидродинамический эквивалент замещения, L_{e_0} — глубина внедрения в сталь, L_f — толщина стального лицевого слоя, B — поперечный размер пластин корунда.

В связи с этим представляется актуальной оценка защитных возможностей хрупких материалов при групповом действии КС.

На рис. 2 приведена схема эксперимента по исследованию коллективного действия КС на керамику. Кумулятивные заряды 1 из взрывчатого вещества массой 40 г, с кумулятивной воронкой из меди толщиной 0.8 mm с полным углом при вершине 60° и диаметром в основании 20 mm, располагались на расстоянии 60 mm от преграды из пластин корунда 2. При детонации заряда формировалась медная струя с градиентом скоростей от 6.5 до 1.5 km/s, которая внедрялась в корунд плотностью 3.7 g/cm^3 , микротвердостью $H_v = 17 \text{ GPa}$ в виде пластин.

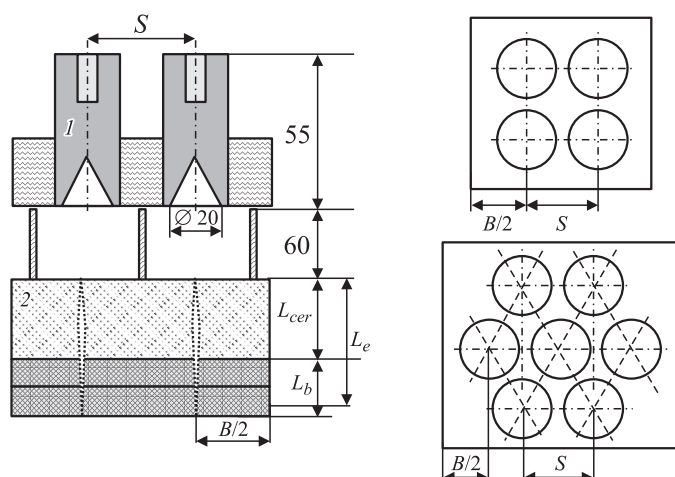


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 — кумулятивный заряд, 2 — преграда, состоящая из слоя корунда толщиной L_{cer} и слоя стеклотекстолита толщиной L_b ; L_e — глубина пробития, S — расстояние между центрами зарядов, $B/2$ — минимальная полуширина керамического элемента для крайнего кумулятивного заряда.

Для фиксирования конечной глубины пробития пластины корунда размещалась на стеклотекстолите (Fiber Glass Reinforced Plastics (FGRP)) плотностью 1.85 g/cm^3 .

Группа кумулятивных зарядов состояла из 4 и 7 зарядов, причем в последней группе было организовано разновременное действие КС.

Данные по количеству кумулятивных зарядов, расстоянию между ними (S), составу преград, размерам пластин, минимальному расстоянию до свободной боковой поверхности ($B/2$) и пробитию приведены в таблице. При одиночном воздействии КС максимальная глубина пробития корунда составляла $\sim 55\text{--}80 \text{ mm}$ в зависимости от поперечного размера пластин корунда B . При избыточных толщинах происходило разрушение всего корунда.

На рис. 3 приведены результаты определения остаточной глубины пробития в стеклотекстолите после слоя корунда при одиночном действии кумулятивного заряда (o) и групповом (x). Замена части

Количество КЗ, одновременность, S	Состав и размеры преграды, mm	B/2, mm	Глубина пробития L_e , mm	Вероятность проявления разгрузки
1 шт.	FGRP 60 × 60	30	148,150,154,145,147 Средняя 148	–
4 шт. Одновременное 40	FGRP 120 × 120	40	162,152,162,152,149, 140 Средняя 153	–
1 шт.	Корунд 100 × 100/ FGRP 100 × 100 $L_{cor} = 50, L_b = 54$	50	84,71,77	2/3
4 шт. Одновременное 110	Корунд 190 × 190/ FGRP 200 × 200 $L_{cor} = 65, L_b = 32$	55	70,67,66,65,66,71 72, <u>80</u>	1/8
7 шт. Одновременное 45	Корунд 155 × 170/ FGRP 200 × 200 $L_{cor} = 56, L_b = 99$	42	62,56,60,56, <u>56,75</u> , <u>76,5</u>	2/7
7 шт. Одновременное 35		50	60, 64, 58, 56, <u>75, 75, 75</u>	3/7
7 шт. Отставание по центру на $15 \mu s$ 45	Корунд 155 × 170/ FGRP 200 × 200 $L_{cor} = 56, L_b = 99$	42	58,58,57,56,56, <u>75</u> Отказ по центру	1/6
7 шт. Опережение по центру на $15 \mu s$ 45		42	<u>74</u> Разброс кумулятивных струй	–

стеклотекстолита на слой корунда ведет к уменьшению глубины пробития (сплошная линия). Обращает на себя внимание, что при групповом действии наблюдается двойственный результат внедрения (см. таблицу): минимальный (основной), который демонстрирует почти полное поглощение КС уже при толщинах корундового слоя 56 mm, и максимальный (подчеркнут), который продолжает тенденцию снижения глубины пробития при действии одиночного заряда. Причем

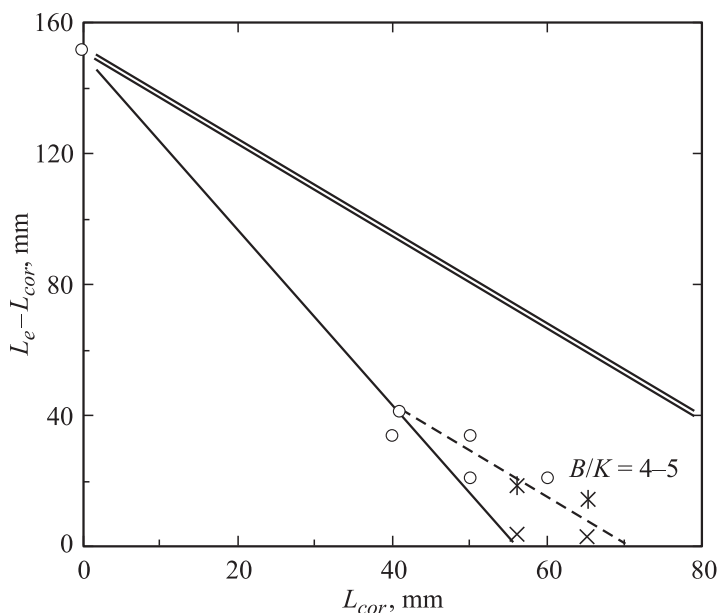


Рис. 3. Остаточное пробитие стеклотекстолита в зависимости от толщины слоя корунда: \circ — для одиночного кумулятивного заряда; \times — средний минимальный результат для группы, $*$ — максимальное пробитие в группе. Остальное, как на рис. 1, 2.

вероятность появления максимального результата увеличивается с уменьшением расстояния $B/2$.

Как видно из таблицы, групповое действие КС может способствовать радиальному схлопыванию в соседней каверне и (или) экранировать боковую волну разгрузки, создавая возможность для полного поглощения всей группы КС при малых размерах керамического элемента $B/2 < 50$ mm.

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 внедрение нарушается (см. таблицу).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что групповое воздействие КС при определенных геометрических и временных соотношениях усиливает эффективность противодействия хрупкого материала высокоскоростному внедрению. Указанные особенности проявляются при дозвуковом характере внедрения.

При проектировании защиты космических и планетных транспортных объектов от техногенного мусора и метеоритов целесообразно использовать комбинированную защиту из высокопрочных хрупких материалов и композитов на основе высокомодульных волокон.

Список литературы

- [1] Румянцев Б.В. // ФТТ. 2011. Т. 53. В. 10. С. 28.
- [2] Румянцев Б.В. // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 6. С. 28.
- [3] Румянцев Б.В. // Труды Междунар. конф. „VII Харитоновские тематические научные чтения“. РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров, 2005. С. 625.
- [4] Hornemann U., Holzwarth A. // Intern. J. Impact Engng. 1997. V. 20. P. 375.