

05

Кинетика внедрения высокоскоростного ударника при взаимодействии с экранной защитой

© Б.В. Румянцев¹, А.И. Михайлин²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² ЗАО „НПО специальных материалов“, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: brum@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 13 июля 2017 г.

Исследуется экранная защита космических аппаратов от высокоскоростного удлиненного ударника, являющегося аналогом наиболее опасных фрагментов космического мусора. Анализируется кинетика внедрения удлиненного ударника в преграду после прохождения экранной защиты. Показано, что эффективность дестабилизации высокоскоростного удлиненного ударника на металлических экранах определяется частичным испарением ударника и экрана, взаимодействующих при скоростях 7–8 km/s.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.03.45580.16970

Подавляющий объем исследований по отработке экранной защиты космических аппаратов проведен при действии высокоскоростного ударника (ВСУ) [1,2]. Установленная классическая форма изменения баллистического предела, определенная при взаимодействии ударника и экрана из алюминиевых сплавов, оставляет открытым вопрос о влиянии фазовых превращений на эффективность экранной защиты. Постоянное увеличение потока техногенного мусора заставляет уделять больше внимания защите от удлиненного ВСУ, так как форма техногенной частицы далека от сферической. Максимальное поражающее действие имеет стержень при совпадении его оси с направлением движения.

В настоящей работе исследуется влияние фазового состояния взаимодействующих материалов ударника и экрана на кинетику внедрения удлиненного ВСУ.

В работе [3] были сформулированы условия получения ВСУ при детонации кумулятивного заряда со скоростью 7–8 km/s. Данный удар-

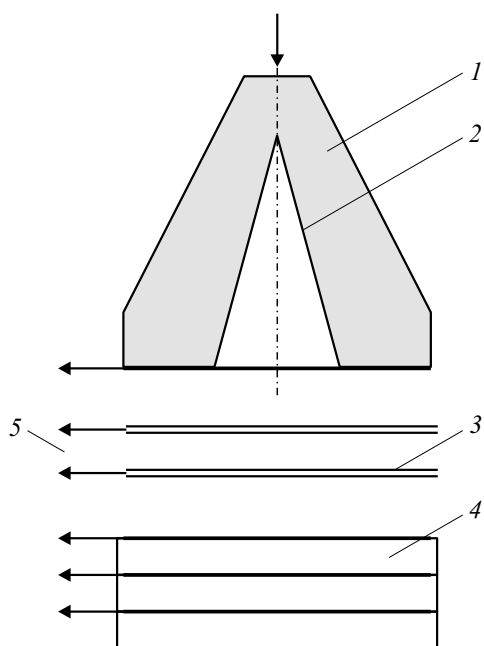


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 — кумулятивный заряд, 2 — медная воронка, 3 — металлические экраны, 4 — преграда, 5 — контактные датчики.

ник предлагается для исследований экранной защиты космических аппаратов от поражения техногенным мусором. В качестве экранов и преград взяты сплавы на основе наиболее распространенных металлов: алюминия, железа и меди.

Стоимость кумулятивного заряда и проведения эксперимента относительно мала, что обеспечивает эффективность систематических исследований защиты космических аппаратов и планетных объектов от техногенного мусора.

На рис. 1 приведена схема эксперимента для исследования действия ВСУ на экраны и металлическую преграду.

Кумулятивный заряд 1 с массой взрывчатого вещества 40 g содержит медную кумулятивную воронку 2 с полным углом при вершине 30° , толщиной 0.08 cm и диаметром в основании 2 cm. Удлиненный ВСУ,

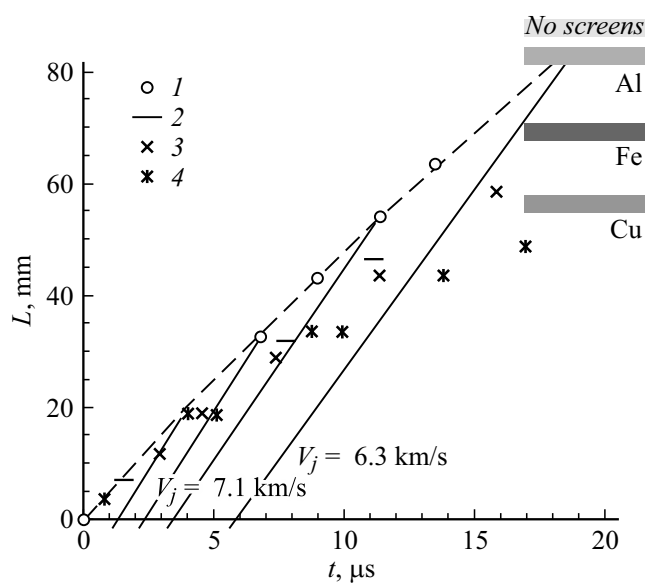


Рис. 2. Результаты определения времен внедрения t ударника в сплав АМГ6 на глубину L . 1 — без экранов, 2 — экраны из АМГ6, 3 — из стали Ст3, 4 — из меди М1. Темные области — соответствующие конечные глубины внедрения в преграду, штриховая кривая — расчет траектории внедрения кумулятивной струи, наклонные прямые — сетка траектории движения элементов кумулятивной струи.

полученный при детонации кумулятивного заряда, пробив экраны 3, внедрялся в металлическую преграду 4, образуя в ней каверну. С помощью контактных датчиков 5 контролировались скорость ударника и его внедрение в преграду. Эксперимент проводился в вакуумной камере при давлении менее 10^4 Па.

В работе [4] было определено, что данный кумулятивный заряд формирует удлиненный ВСУ медной струи со средней скоростью 7.4 km/s , длиной $\sim 26 \text{ mm}$, диаметром 1.2 mm , массой 0.24 g и энергией $6.5\text{--}7.1 \text{ kJ}$. Начальное распределение скорости струи составляло от 8.2 до 6.3 km/s , что нужно учитывать при увеличении расстояния до преграды при размещении экранной защиты.

На рис. 2 приведены результаты исследования внедрения удлиненного ВСУ в преграду из сплава АМГ6 с фокусным расстоянием 6 см, в котором размещались два металлических экрана либо из алюминиевого сплава АМГ6 толщиной 0.36 см, либо из стали Ст3 толщиной 0.11 см, либо из меди М1 толщиной 0.1 см каждый. Толщины экранов обеспечивали примерно равную массу на единицу поверхности 1.9–1.7 г/см². Поскольку формируемый удлиненный ударник имел градиент скоростей, конечная глубина пробития в отсутствие экранов при фокусном расстоянии 6 см составляла 9.6 см. Экспериментальные времена внедрения кумулятивной струи (рис. 2) совпадают с расчетом действия кумулятивного заряда [5,6]. Применение двух экранов из сплава АМГ6 снижает глубину внедрения с учетом толщины экранов до 8.3 см. Значительное уменьшение глубины внедрения наблюдается при выполнении экранов из стали (до 6.9 см) и в особенности из меди (до 5.6 см). Соответствующие времена отклоняются в сторону замедления внедрения.

Действие экранов сводится к исключению участков кумулятивной струи из процесса пробития преграды за счет:

- гидродинамического расхода на преодоление экранов [6];
- эжекции материалов ударника и экрана из зоны взаимодействия [1];
- рассеивания возмущенных частей удлиненного ВСУ между экранами и преградой [1,2].

Поэтому траектория внедрения (рис. 3) представляет собой совокупность участков проникания (участки II) со скоростью U и „ожидания“ подхода следующего отрезка ВСУ со скоростью V_j (участки III). Связь между скоростью ударника и его внедрением в преграду при высоких скоростях следует из уравнения Бернулли [6]

$$U = V_j / (1 + (\rho_t / \rho_j)^{0.5}),$$

где ρ_t и ρ_j — плотности преграды и ударника соответственно.

Для сравнения приведена траектория внедрения удлиненного ударника в отсутствие экранов (траектория I).

Графоаналитическое отслеживание движения элемента струи от момента зарождения до поглощения при образовании каверны в преграде [6] и сопоставление с экспериментальными временами позволили оценить кинематические параметры взаимодействия ударника и экрана:

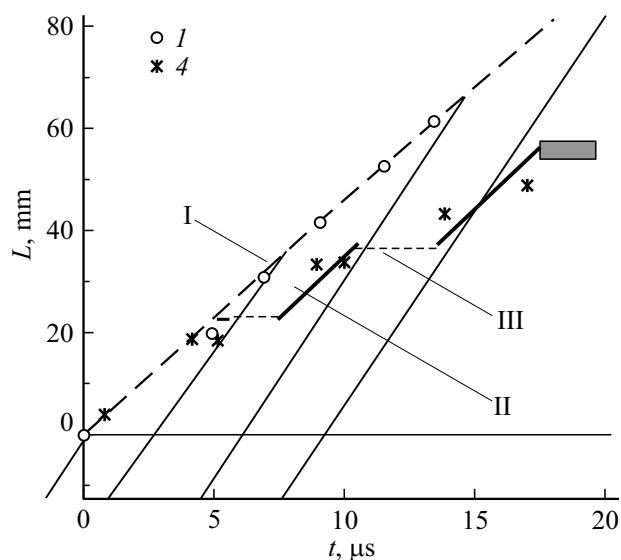


Рис. 3. Восстановление траектории внедрения удлиненного ударника в сплав МГ6 после прохождения медных экранов. I — траектория внедрения в отсутствие экранов, II — участки проникания, III — участки ожидания. Остальные обозначения те же, что на рис. 2.

время задержки $0.7\text{--}0.8\ \mu\text{s}$, время действия $1.3\text{--}1.5\ \mu\text{s}$. За указанное время через экран пролетает $0.8\text{--}1\ \text{cm}$ длины ударника. Эта часть ударника не участвует в пробитии преграды.

Экспериментальные результаты свидетельствуют о дестабилизации значительных участков удлиненного ВСУ со скоростью $8\text{--}7\ \text{km/s}$ при прохождении экранов и влиянии на этот процесс фазового состояния взаимодействующих материалов. Для подтверждения оценивалось давление в зоне внедрения с помощью метода торможения [7] по пересечению ударной адиабаты материала экрана и отраженной ударной адиабаты медного ударника. Используя уравнение состояния при высоких давлениях [8–10], можно при известном давлении на ударной адиабате определить фазовое состояние взаимодействующих материалов и дальнейшее его изменение по изоэнтропе расширения при образовании каверны в преграде.

Наиболее сильно дестабилизация ВСУ проявляется при прохождении медных экранов, когда возможно частичное испарение ударника и экрана при разгрузке из зоны внедрения с начальным давлением 320 GPa [4], и в меньшей степени при прохождении стальных экранов, материал которых в зоне внедрения с начальным давлением 290 GPa плавится, а ударник частично испаряется при разгрузке. Значительное снижение глубины пробития преграды не может быть объяснено только рассеивающим действием экранов. Так, прохождение алюминиевых экранов мало сказывается на глубине пробития преграды. Как показано в [4], медный ударник и алюминиевый экран в зоне взаимодействия с начальным давлением 160 GPa только плавятся.

Прерывистый характер внедрения отражает задержку радиальной реакции и время действия области внедрения в экране на удлинённый ударник. Появление „газовой“ фазы меди меньшей плотности в зоне взаимодействия с экраном приводит к дестабилизации значительных частей удлинённого ударника по сравнению с толщиной экрана.

Проведённые исследования не противоречат результатам работы [2], где влияние испарения не отражается на изменении баллистического предела. Соударение Al–Al до скоростей 12–13 km/s не приводит к испарению алюминия при разгрузке из зоны внедрения.

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Экранная защита преграды из сплава АМГ6 от действия медного удлинённого ВСУ приводит к снижению глубины пробития на 41 и 28% в случае применения медных и стальных экранов соответственно.

2. Показано, что частичное испарение при расширении ударно сжатых взаимодействующих металлов ударника и экрана дестабилизирует значительную часть направленного действия удлинённого ВСУ. Рассеивание в межэкранном пространстве возмущённых частей ВСУ исключает их из пробития основной преграды.

3. Учёт фазовых переходов при высокоскоростном поражении необходим для прогнозирования эффективности экранной защиты.

Список литературы

- [1] IADC-04-03 v. 7. Protection manual. 2014. 288 p.
- [2] Christiansen E.L. Meteoroid/debris shielding. TP-2003-210788. Houston: NASA Johnson Space Center, 2003. P. 114.

- [3] *Rumyantsev B.V., Mikhaylin A.I.* // Acta Astron. 2015. V. 109. P. 166–171; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576514004949>
- [4] *Rumyantsev B.V., Mikhaylin A.I.* // Acta Astron. 2017. V. 135. P. 15–20; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576516309183>
- [5] *Румянцев Б.В.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 23. С. 1–8.
- [6] *Румянцев Б.В.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 6. С. 28–32.
- [7] <http://www.ihed.ras.ru/rusbank/>
- [8] *Жарков А.П., Мисоночников А.Л., Румянцев Б.В., Фортвов В.Е.* Нерегулярное отражение конически сходящихся ударных волн. Черноголовка: ОИХФ, 1989. 68 с.
- [9] *Фортвов В.Е., Ломоносов И.В.* // УФН. 2014. Т. 184. № 3. С. 231–245.
- [10] *Минаков Д.В.* Расчет термодинамических свойств плотной плазмы металлов. М.: ОИВТ РАН, 2015. С. 96.