

УДК 629.198.624

ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ УДАР СТАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ПО ПРЕГРАДАМ ИЗ ПОРИСТОЙ МЕДИ

Л. А. Мержиевский, В. П. Чистяков

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, merzh@hydro.nsc.ru

Представлены результаты исследования удара стальных шаров малого диаметра по нормали к поверхности полубесконечных преград из пористой меди. Проведено сравнение характеристик сформировавшихся кратеров с результатами других работ по удару по высокопористым мишеням. Полученные новые экспериментальные данные создают основу для продолжения исследований и могут быть учтены при создании моделей для описания высокоскоростного удара по пористым средам.

Ключевые слова: высокоскоростной удар, полубесконечная преграда, пористая среда.

Изучение высокоскоростного удара компактных частиц по преградам различного типа, сформировавшееся в самостоятельное научное направление с началом развития космонавтики, продолжает оставаться актуальным в связи с проблемами защиты космических аппаратов от воздействия космического мусора. Решению возникающих при этом задач посвящено большое количество работ. Частично итоги начального периода исследований подведены в [1–3]. В настоящее время продолжают появляться многочисленные публикации на эту тему, причем большая часть из них посвящена численному моделированию процессов соударения.

В экспериментальных исследованиях решаемые задачи группируются по ряду основных направлений: удар по полубесконечным мишеням, предельное пробивание (баллистический предел), приводящее к разгерметизации объекта, удар по тонким мишеням (экранам), по хрупким, композитным и пористым мишеням.

Для понимания физических особенностей высокоскоростного удара важнейшей является задача кратерообразования в полубесконечных мишенях. Каждому типу материалов мишени (пластичные, хрупкие, композитные, пористые) присущи свои особенности формирования кратеров. В случае пористых преград чаще всего изучали высокоскоростной удар по мишеням из материалов с высокой пористостью [4–7]. В качестве материалов преград пониженной плотности в основном использовали грунт или песок.

Номер эксперимента	v , км/с	d , мм	h , мм	D , мм	ρ_{00} , г/см ³
1	3	1.95	1.6 ± 0.1	3.2 ± 0.1	8.9
2	3	1.95	4.9 ± 0.2	6.85 ± 0.15	6.3
3	7.3	0.83	2.8 ± 0.1	3.75 ± 0.05	5.3
4	8.2	0.43	2 ± 0.1	2.4 ± 0.1	5.3
5	3	1.95	7.8 ± 0.1	7.15 ± 0.15	3.8

В данной работе приведены результаты исследования удара стальных шаров малого диаметра по полубесконечным преградам из пористой меди по нормали к поверхности. Частицы диаметром $d = 0.43 \div 1.95$ мм разгонялись с помощью газокумулятивного заряда взрывчатого вещества до скоростей $v = 3 \div 8.2$ км/с. Используемая методика разгона частиц детально описана в [8]. Мишенями служили достаточно толстые пластины, размеры которых позволяли считать, что удар наносится по полубесконечной преграде. Пластины прессовали из медного порошка, состоявшего из частиц субмикронного размера. Для предотвращения возникновения поверхностной оксидной пленки порошок до прессования хранили в герметичной упаковке. Плотность полученных пористых образцов ρ_{00} менялась в диапазоне $6.3 \div 3.8$ г/см³. Результаты экспериментов приведены в таблице.

Характерные кратеры, образовавшиеся после удара, показаны на рис. 1 (плотность материала мишени 5.3 г/см³, слева — скорость удара $v = 7.3$ км/с, $d = 0.83$ мм, справа —

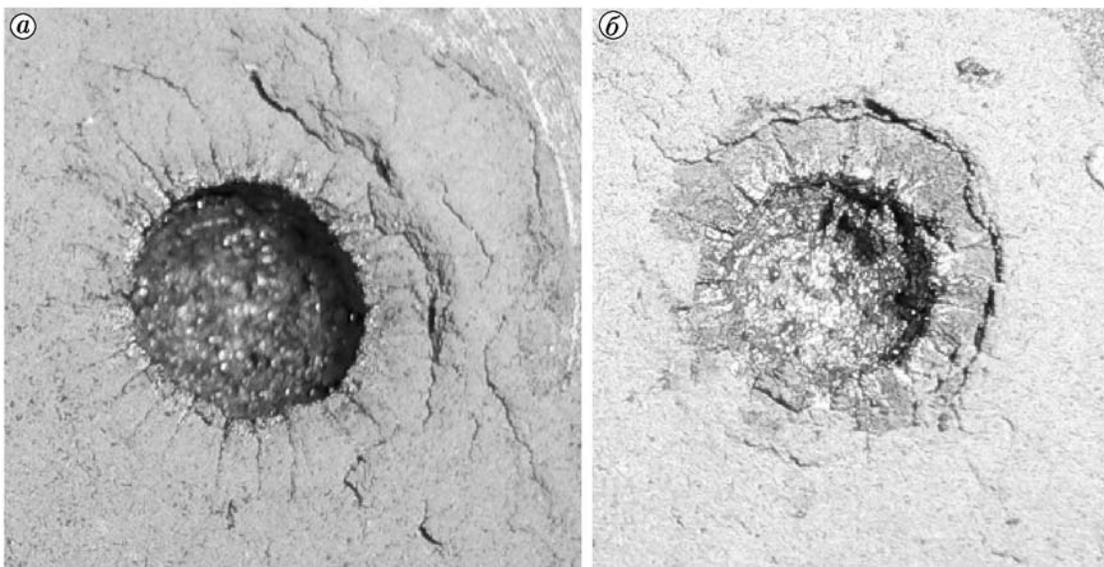


Рис. 1. Фотографии кратеров в мишени из пористой меди

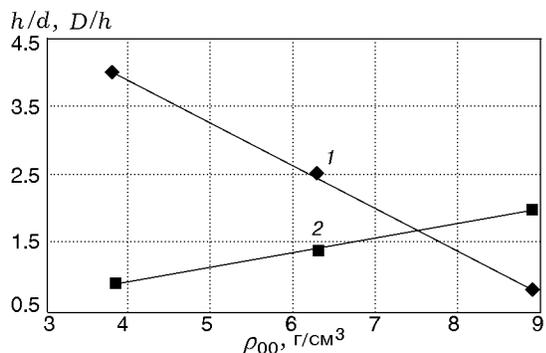


Рис. 2. Глубина и форма кратеров

$v = 8.2$ км/с, $d = 0.43$ мм, масштабы увеличения на фотографиях различны). Внешний вид кратеров отличается от вида кратеров в монолитных металлических мишенях. Характерным является отсутствие валика у края кратера на лицевой стороне преграды: валик отрывается при разгрузке ввиду малой прочности материала. По краю кратера наблюдается четко выраженная система радиальных трещин. Подобная система трещин возникает и при ударе по преградам из хрупких материалов [9], но в таких материалах сопровождается еще и системой кольцевых трещин, которая в данном случае отсутствует. Зависимость относительной глубины кратера h/d от плотности при $v = 3$ км/с показана на рис. 2 (точки и прямая 1). Здесь же приведена зависимость отношения диаметра кратера к его глубине D/h

от плотности (точки и прямая 2). Обычно считают, что кратеры, образующиеся при высокоскоростном ударе в изотропных пластичных преградах, имеют форму, близкую к полусферической. Аномальное отклонение формы кратера от полусферической установлено при ударе по мишеням из алюминия и магния [1]. В нашем случае (это коррелирует с естественными результатами для высокопористых сред) с уменьшением плотности кратер приобретает форму сильно вытянутого сфероида.

В [5] исследовалось влияние плотности материала мишени на глубину кратера в широком диапазоне изменения пористости. Обобщающая зависимость [5] при скорости удара 6 км/с (точки 2) приведена на рис. 3, где пред-

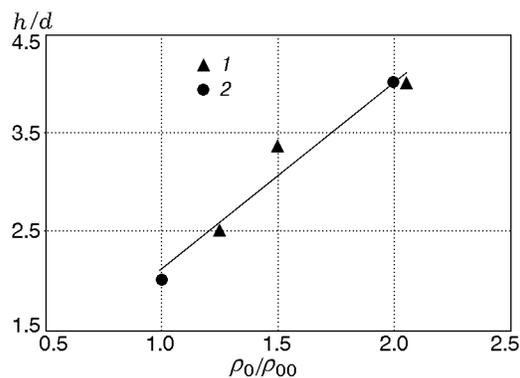


Рис. 3. Зависимость глубины кратера от пористости материала мишени

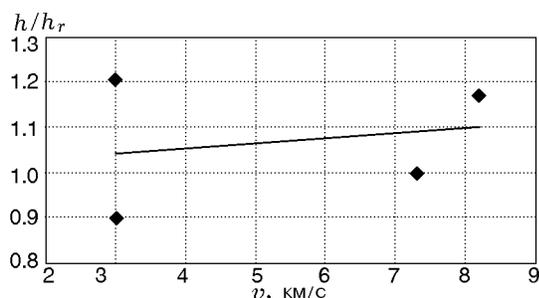


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных глубин кратеров

ставлены также полученные нами результаты (точки 1). Несмотря на отличия в скоростях соударения, наши данные вполне согласуются результатами [5].

Анализ процесса кратерообразования при высокоскоростном ударе базируется на двух основных подходах. В первом используется пришедшая из физики взрыва гипотеза о пропорциональности объема образующегося кратера кинетической энергии ударяющего тела. Полученных данных недостаточно для анализа на основе этого подхода. В основе второго подхода лежат принципы теории кумуляции. Построенные в этом случае полуэмпирические соотношения позволяют учесть роль плотности материала мишени. Одна из известных формул имеет вид [1]

$$h = \frac{D}{2} + d \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{00}}},$$

где ρ_0 — плотность материала ударника. Сравнение рассчитанных по этой формуле значений глубины кратера h_r (линия) с нашими экспериментальными данными (точки) иллюстрирует рис. 4. Видно, что оценки по приведенной формуле значительно отклоняются от результатов экспериментов.

Полученные в работе новые экспериментальные данные создают основу для продолжения исследований и могут быть учтены при создании моделей для описания высокоскоростного удара по пористым средам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эйчельбергер Р., Кайнике Дж. Высокоскоростной удар // Физика быстротекающих процессов / под ред. Н. А. Златина. — М.: Мир, 1971. — Т. 2. — С. 204–246.
2. **Высокоскоростные** ударные явления. — М.: Мир, 1973.
3. Мержиевский Л. А., Титов В. М. Высокоскоростной удар // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 92–108.
4. Прякин Г. В., Титов В. М. Исследование удара тела с высокой скоростью в легкий пористый материал // ПМТФ. — 1969. — № 5. — С. 110–113.
5. Love S. G., Horz F., Brownlee D. E. Target porosity effects in impact cratering and collisional disruption // Icarus. — 1993. — V. 105. — P. 216–224.
6. Domínguez G., Westphal A. J., Jones S. M., Phillips M. L. F. Energy loss and impact cratering in aerogels: theory and experiment // Icarus. — 2004. — V. 172. — P. 613–624.
7. Kadono T., Niimi R., Okudaira K., Hasegawa S., Tabata M., Tsuchiyama A. Penetration into low-density media: In situ observation of penetration process of various projectiles // Icarus. — 2012. — V. 221. — P. 587–592.
8. Мержиевский Л. А., Титов В. М., Фаденко Ю. И., Швецов Г. А. Высокоскоростное метание твердых тел // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 77–91.
9. Титов В. М. Особенности разрушений при ударе метеорита по стеклу // ПМТФ. — 1976. — № 4. — С. 127–130.

Поступила в редакцию 11/IV 2014 г.