

ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОРИСТОГО ТЕЛА С ПЛАСТИНОЙ

В. М. Титов, Л. А. Мержиевский, С. М. Караханов, С. А. Бордзиловский

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Проведено экспериментальное исследование взаимодействия сплошных и пористых цилиндров с налетающей пластиной при скорости соударения $3,3 \div 4,6$ км/с. Выявлены качественные различия процессов, связанные с механикой деформирования компактных пористых тел. Установлена двухстадийность процесса сжатия пористых образцов. Полученные данные могут быть привлечены для объяснения особенностей строения ударных кратеров на поверхности планет.

В проблеме высокоскоростного удара одной из важных не решенных до сих пор задач является исследование взаимодействия компактных тел с преградой при высоких ($> 15 \div 20$ км/с) скоростях при строго контролируемых условиях эксперимента. Предполагается, что при этом существенное влияние на процесс взаимодействия и его конечный результат могут оказать плавление и испарение материала тела или тела и преграды одновременно. Современные методы позволяют ускорять до таких скоростей тонкие пластинки малого поперечного размера или мелкие частицы (с характерным размером в доли миллиметра). Такой масштаб явления затрудняет контроль условий и выявление деталей процесса взаимодействия частиц с преградами. В данном исследовании предложено моделировать процесс с использованием в качестве ударника компактного тела из пористого материала. В этом случае прирост тепловой составляющей внутренней энергии в теле при соударении существенно выше, поэтому можно достичь условий плавления и испарения (хотя бы частичного) вещества ударника уже при скоростях соударения $\approx 3 \div 6$ км/с. Независимо от этого моделируемые тела — метеориты и астероиды — могут обладать значительной пористостью, поэтому предложенная постановка отражает и эту особенность реальных соударений.

Традиционно исследование процессов, сопровождающих ударное нагружение пористых тел, проводится в основном с целью построения уравнений состояния конденсированных сред при экстремальных плотностях энергии. Для этого естественно выбирать наиболее простую постановку экспериментов, при которой явление не осложняется геометрическими фак-

торами и допускает четкую физическую интерпретацию. Указанным требованиям удовлетворяют эксперименты с нагружением исследуемого вещества стационарными плоскими ударными волнами, теория которых хорошо разработана. В реальных условиях при ударах метеоритов или астероидов по поверхности планет реализуется пространственное нестационарное течение, от особенностей которого может зависеть конечный результат взаимодействия — ударный кратер. Имеющейся информации достаточно, чтобы предсказать основные параметры кратера, образующегося в изотропных средах при ударе компактных сплошных тел (см., например, [1]). Авторам известна только одна работа [2], в которой упоминается о наблюдении соударения пористых тел с преградами в эксперименте.

В проведенных исследованиях использована методика метания преграды на цилиндрический образец из пористого материала с высотой, равной диаметру. С помощью взрывного устройства металась стальная пластина толщиной $s = 1$ мм и диаметром $d = 25$ мм при скорости $v = 3,35$ км/с и $d = 30$ мм при $v = 4,6$ км/с. Деформацию образца и пластины регистрировали двумя рентгеновскими импульсными установками с предельной энергией излучения ≈ 600 кэВ и длительностью импульса излучения менее 0,15 мкс. Момент экспозиции определен с точностью не хуже 0,1 мкс. Сравнились процессы при нагружении сплошных и пористых образцов из меди (плотность пористых образцов $\rho_0 \approx 3,5$ г/см³), свинца ($\rho_0 \approx 7,21$ и $5,88$ г/см³) и цинка ($\rho_0 \approx 3,56$ г/см³).

Рентгенограммы для одного и того же момента времени после соударения, демонстрирующие принципиальные различия процессов

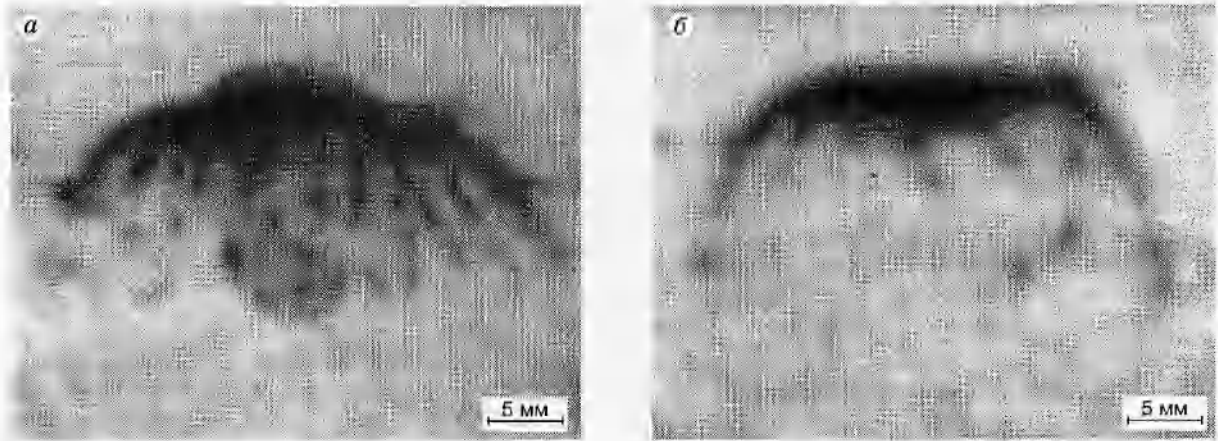


Рис. 1. Удар по образцам из меди:

a — сплошной, *б* — пористый; $v = 3,35$ км/с, $d = 25$ мм, диаметр и высота цилиндров 10 мм

взаимодействия сплошных и пористых образцов, приведены на рис. 1. Картина деформирования сплошного тела после взаимодействия с пластиной характерна для данного явления и проанализирована, например, в [3]. Пористый образец к моменту регистрации приобрел форму пластинки. Несмотря на его существенно меньшую прочность, не зафиксированы отколы ни с лицевой, ни с тыльной поверхности, наблюдающиеся в случае сплошного тела. Максимальный поперечный размер пористого образца заметно меньше, чем сплошного. В дополнительном опыте при тех же условиях определена скорость радиальной деформации образца из сплошного алюминия, плотность которого близка к ρ_0 для меди. Радиальная скорость этого образца также существенно меньше, чем у пористого.

Отмеченные качественные различия в деформировании сплошных и пористых тел сохраняются и в случае образцов из свинца и цинка. При этом наблюдаются и различия в разлете пористых образцов из разных материалов. Так, например, на рис. 2 приведены рентгенограммы разлета пористого свинцового образца в два момента времени с разницей в 6,8 мкс. Деформирующаяся «пластина», образовавшаяся на первом этапе сжатия, к моменту съемки приобрела форму, близкую к конической. Края потеряли четкие очертания, в направлении движения образца появились выбросы в форме струй. Это является характерными признаками плавления материала в ударной волне, отмечавшимися и обсуждавшимися в [4]. Аналогичные эффекты наблюдаются и для образ-

цов из цинка, в том числе и сплошных. Простые оценки с привлечением данных [4–7] показывают, что в случае свинцовых образцов в экспериментах достигаются условия плавления материала в ударной волне, а для цинковых — и частичного испарения материала при разгрузке.

Из анализа всех полученных экспериментальных данных следует, что в каждом из рассмотренных случаев при высокоскоростном взаимодействии компактных пористых образцов с тонкой преградой наблюдаются свои особенности, связанные, по-видимому, с реальными свойствами конкретных материалов. В то же время наблюдаются общие закономерности, отсутствующие для образцов из сплошного материала. Главная из них — двухстадийность деформирования пористых образцов. Четко прослеживается стадия сжатия, в результате которого первоначально цилиндрический образец приобретает форму, близкую к форме пластины, утолщающейся к центру. На второй стадии происходит разлет сформированного тела, находящегося в сжатом состоянии. Если предположить аналогичный характер деформирования хотя бы некоторых космических тел при соударении с поверхностью планет, то в ряде случаев этим можно объяснить возникновение «плоских» кратеров на их поверхности (укажем на «плоские» кратеры при ударах дисками [8]).

Для объяснения наблюдающейся двухстадийности необходимо более детальное изучение явления. Напомним, что речь идет о сжатии и разлете образцов с высокой пористо-

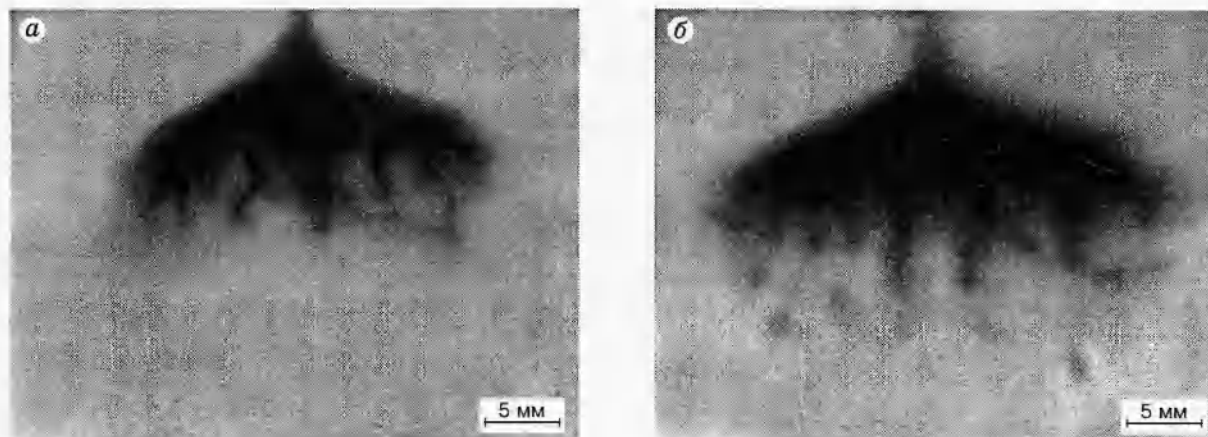


Рис. 2. Удар по пористому образцу из свинца:

$v = 4,6$ км/с, $d = 30$ мм, диаметр и высота цилиндра 10 мм, время от момента разгона пластины $t = 51,6$ (а) и $58,4$ мкс (б)

стью (для медных средняя плотность составляет $\approx 0,39$ от плотности сплошного, для свинцовых $\approx 0,52 \div 0,64$, для цинковых $\approx 0,5$) при существенной неоднородности процессов, связанной с малостью размеров образцов. Уже сейчас можно указать, что обнаруженные эффекты необходимо учитывать при построении моделей для описания поведения высокопористых тел при интенсивных динамических нагрузках.

Авторы благодарны В. В. Зыкову и Н. Г. Скоробогатых за помощь в постановке экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 97-01-00774 и 96-15-96264).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержиевский Л. А., Титов В. М. Высоко-скоростной удар // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5. С. 92–108.
2. Афанасьева С. А., Белов Н. Н., Козорезов К. И. и др. Особенности высокоскоростного проникания сильно пористого ударника в мишень конечной толщины // Докл. РАН. 1997. Т. 355, № 2. С. 192–195.
3. Мержиевский Л. А., Титов В. М. Проби-вание пластин при высокоскоростном ударе // ПМТФ. 1975. № 3. С. 102–110.
4. Беляков Л. В., Валицкий В. П., Златин Н. А., Мочалов С. М. О плавлении свинца в ударной волне // Докл. АН СССР. 1966. Т. 170, № 3. С. 540–543.
5. Урлин В. Д. Плавление при сверхвысоких да-влениях, полученных в ударной волне // ЖЭТФ. 1965. Т. 49, вып. 2. С. 485–492.
6. Фортон В. Е., Дремин А. Н. Определение температуры ударно-сжатой меди по измерению параметров в волне разгрузки // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 9, № 5. С. 743–745.
7. Brannon R. M., Chhabildas L. C. Shock-induced vaporization of zinc // Shock Compression of Condensed Matter-1995 / S. C. Schmidt, W. C. Tao (Eds). Woodbury, New York: AIP Press, 1996. Pt 1. P. 201–206.
8. Беляков Л. В., Валицкий В. П., Златин Н. А. О роли тепловых явлений при соударении металлических тел // Докл. АН СССР. 1965. Т. 160, № 2. С. 314–316.

Поступила в редакцию 12/1 1999 г.