

**О РАСПРОСТРАНЕНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ  
В ПОРИСТОМ МАТЕРИАЛЕ,  
ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ СОУДАРЕНИИ ПЛАСТИН**

*С. П. Киселев*

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,  
630090 Новосибирск*

Приведены результаты исследования распространения ударных волн в пористом алюминии. Показано, что численные расчеты по модели, учитывающей влияние пластической зоны, согласуются с экспериментом.

Рассмотрим упругопластический материал, содержащий большое число  $N$  сферических пор. Точно решить задачу о деформировании такого материала практически невозможно. Поэтому широкое применение получил приближенный подход, в котором с помощью методов осреднения переходят от  $N$ -связного тела к материалу с пористостью  $m_1$  и некоторыми эффективными прочностными характеристиками. В настоящее время существует большое количество методов осреднения, обзор которых дан в [1]. В этих работах предполагалось, что пластические деформации в пористом теле наступают после того, как средние напряжения выйдут на поверхность текучести. Для пористого материала этого условия недостаточно. В частности, если среднее давление велико, то под действием его в окрестности поры возникает пластическая область, и пластические деформации происходят даже в том случае, когда средние напряжения не лежат на поверхности текучести. В работах [2, 3] построена математическая модель, учитывающая влияние пластической зоны на деформирование пористого материала.

Исследуем распространение ударных волн (УВ) в пористом алюминии на основе данной модели, уравнения которой приведены в [2, 3], а в одномерном нестационарном случае — в [4]. Уравнения решаются численно по схеме «крест» [5]. Пусть происходит удар сплошной пластиной Al 6061-T6 (1) по пористой пластине Al 2024 (2) (рис. 1). За пористой пластиной находилась пластина (3) из плавленого кварца, в которой на глубине  $h_3$  было заделано зеркало (4). По смещению зеркала определялся профиль скорости за фронтом УВ.

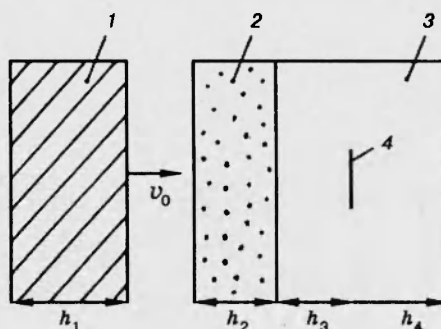


Рис. 1.

Численные расчеты проводились для материалов и условий нагружения [6]. Объемный модуль упругости  $K_s$  и предел текучести  $Y_s$  материала находились по формулам

$$K_s = A + 2B(\Theta - 1) + 3C(\Theta - 1)^3, \quad \Theta = 1 - \varepsilon_{kk}^e,$$

$$Y_s = (Y_0 + \eta \varepsilon_1^p)(1 + b_s(\varepsilon_1^p)^m).$$

Здесь  $\varepsilon_1^p$ ,  $\varepsilon_1^p$  — скорость деформации и деформация при одноосно деформированном нагружении,  $\varepsilon_{kk}^e$  — первый инвариант тензора упругих де-

формаций,  $\eta$ ,  $b_s$  — вязкость и коэффициент деформационного упрочнения. Свойства материалов, использованных в расчетах, приведены из [7–9]. Согласно [7], для Al 6061-T6 имеем:  $A = 0,8$  Мбар,  $B = 1,07$  Мбар,  $C = 0$ ,  $\eta = 10^{-4}$  Мбар·мкс,  $b_s = 0$ ,  $Y_0 = 3 \cdot 10^{-3}$  Мбар,  $\mu_s = 0,248$  Мбар,  $\rho_s = 2,785$  г/см<sup>3</sup>,  $\nu = 0,347$ ,  $\Gamma_s = 2$ ; пористый Al 2024 [6, 8]:  $A = 0,79$  Мбар,  $B = 1,05$  Мбар,  $C = 0,13$  Мбар,  $\eta = 10^{-4}$  Мбар·мкс,  $b_s = 0$ ,  $Y_0 = 10^{-3}$  Мбар,  $\mu_s = 0,248$  Мбар,  $\rho_s = 2,785$  г/см<sup>3</sup>,  $\nu = 0,27$ ,  $\Gamma_s = 2$ ; плавленный кварц [9]:  $A = 0,776$  Мбар,  $B = 2,1$  Мбар,  $C = 11$  Мбар,  $\eta = 10^{-4}$  Мбар·мкс,  $b_s = 0$ ,  $Y_0 = 10^{-6}$  Мбар,  $\mu_s = 10^{-5}$  Мбар,  $\rho_s = 2,2$  г/см<sup>3</sup>,  $\Gamma_s = 2$ , где  $\Gamma_s$ ,  $\nu$ ,  $\mu_s$ ,  $\rho_s$  — коэффициент Грюнайзена, модуль Юнга, модуль сдвига и плотность материала.

Толщина ударника  $h_1 = 6$  мм, пористой пластины  $h_2 = 3$ , плавленного кварца  $h_4 = 36$  мм. На свободных поверхностях ставилось условие

$\sigma_1 = 0$ , а на контактных разрывах — непрерывность скоростей и напряжения  $\sigma_1$ . В точке, соответствующей координате зеркала  $h_3 = 6$  мм [6], рассчитывалась скорость в зависимости от времени.

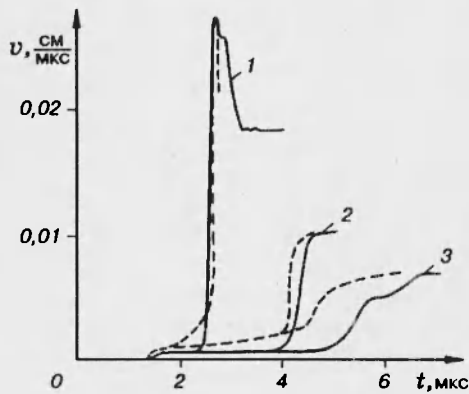


Рис. 2.

На рис. 2 приведена зависимость скорости материала  $v(t)$  для различных скоростей удара  $v_p$ . Сплошными линиями показаны результаты расчета, штриховыми — данные эксперимента. Кривые на рис. 2 соответствуют следующим значениям скорости удара и начальной пористости:

$v_p = 0,5$  (1),  $0,244$  (2) и  $0,18$  мм/мкс (3),  $m_1^0 = 0,23$  (1) и  $0,22$  (2, 3). Видно, что имеется удовлетворительное совпадение численных расчетов с экспериментом [6]. Некоторое отличие по времени прихода УВ при  $v_p = 0,18$  мм/мкс связано с упрочнением пористого Al в эксперименте [6].

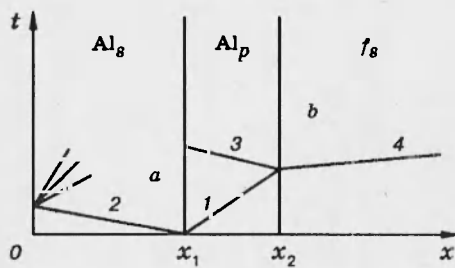


Рис. 3.

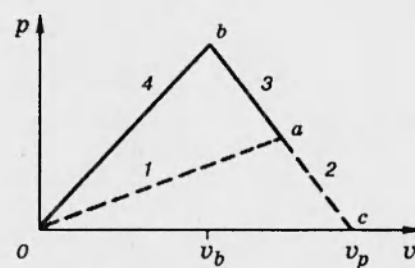


Рис. 4.

Анализ фотографий пористого Al [6] показывает, что имеется значительный разброс в размерах и форме пор. Поэтому сразу после прихода упругого предвестника начнется затекание пор с низким критическим давлением  $[p_*]$ . Это относится, например, к плоским порам типа «блинов». Затекание пор приведет к росту  $Y$ , скорости  $v$  и, соответственно, увеличению скорости пластической УВ.

Отметим, что УВ, описываемая кривой 3, имеет выраженную трехволновую структуру. Ранее такая структура УВ наблюдалась в пористом железе [10]. Однако здесь, в отличие от [10], третья волна возникает

в результате отражения вторичной УВ от контактной границы пористый Al 2024 — сплошной Al 6061. (Вторичная УВ образуется при отражении проходящей УВ от контактной границы между пористым Al и плавленным кварцем).

Первичная УВ в пористом материале имеет двухволновую структуру, состоящую из упругого предвестника и пластической УВ. В [6] отмечено, что при  $v_p = 0,18$  и  $0,126$  мм/мкс УВ неустойчива, поэтому измеряемая зависимость  $v(t)$  не может быть использована для количественного анализа.

По-видимому, в работе [6] имеется неточность, связанная с тем, что кривой 1 приписывается скорость удара  $v_p = 0,366$  мм/мкс, тогда как должно быть  $v_p = 0,5$  мм/мкс. Дело в том, что акустические импедансы Al и плавленного кварца близки между собой, поэтому при  $v_p \geq 0,3$  км/с скорость волны за фронтом УВ в кварце должна быть близка к  $v_p/2$ . Для доказательства данного предположения рассмотрим распространение УВ в системе пластин (рис. 3). Пренебрегая сдвиговыми напряжениями и считая скорость УВ  $D \approx c$ , определим давление за фронтом УВ по формуле

$$p \pm \rho c v = I_{\pm},$$

где  $I_{\pm}$  — инварианты Римана. После соударения пластин в пористый алюминий ( $Al_p$ ) побегит ударная волна УВ1, а в сплошной алюминий ( $Al_s$ ) — УВ2. Состояние, возникающее после распада разрыва (точка  $a$ ), определяется на  $p$ - $v$ -диаграмме (рис. 4) из условия пересечения прямых

$$p_a = (\rho c)_s(v_p - v_a), \quad p_a = (\rho c)_p v_a, \\ (\rho c)_p < (\rho c)_s,$$

где  $(\rho c)_s$  — акустический импеданс  $Al_s$ ,  $(\rho c)_p$  — акустический импеданс  $Al_p$ . После выхода УВ1 на контактную границу  $x_2$  снова происходит распад разрыва. В плавленном кварце распространяется УВ4, а в  $Al_p$  — УВ3. Давление  $p_b$  за УВ3, 4 (состояние  $b$  на  $p$ - $v$ -диаграмме, см. рис. 4) определяется из уравнений

$$p_b = (\rho c)_{fs} v_b, \quad p_b = p_a + (\rho c)'_p(v_a - v_b),$$

где  $(\rho c)'_p$  — акустический импеданс  $Al_p$ , сжатого в УВ1, а индекс  $fs$  относится к плавленому кварцу. Как показали численные расчеты, при  $v_p > 0,3$  км/с происходит полное затекание пор, поэтому  $(\rho c)'_p = (\rho c)_s$ . Отсюда следует, что отрезки  $ab$  и  $ac$  лежат на одной линии, и  $obc$  является треугольником, из которого найдем  $v_b = (\rho c)_s v_p / ((\rho c)_s + (\rho c)_{fs})$ .

Подставляя  $(\rho c)_{fs} = 1,3$  Мбар·мкс/см,  $(\rho c)_s = 1,49$  Мбар·мкс/см, получим  $v_b = 0,504 v_p$ . Таким образом, доказательство завершено.

Отметим, что расчеты, проведенные при  $v_p = 0,366$  мм/мкс, дают скорость за фронтом УВ в кварце  $v \approx 0,2$  мм/мкс.

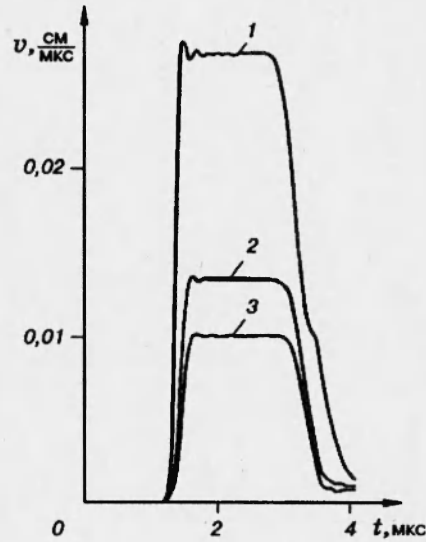


Рис. 5.

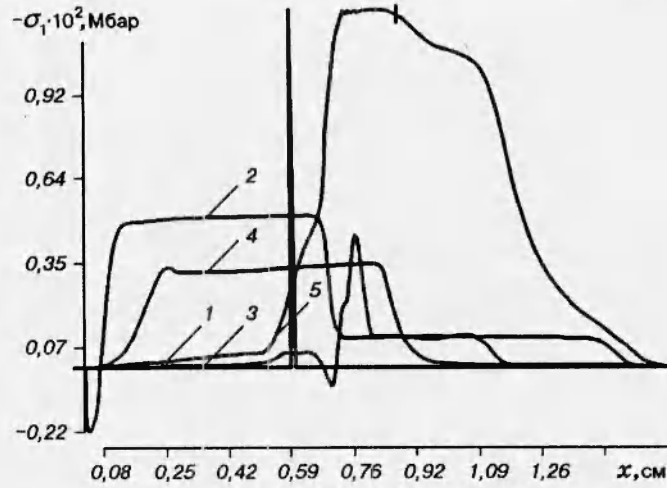


Рис. 6.

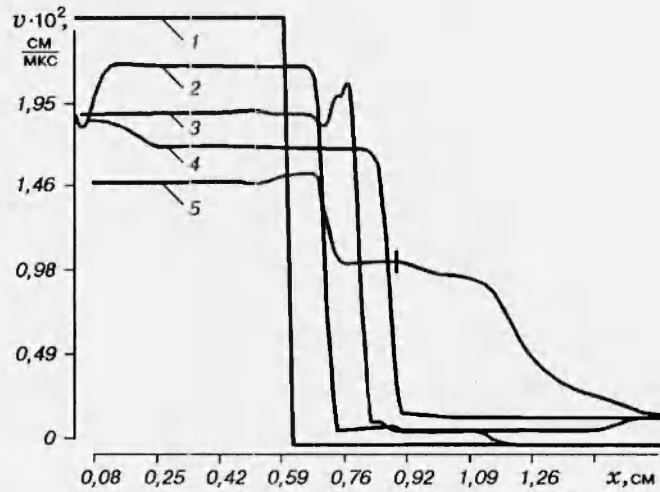


Рис. 7.

Для оценки влияния пористости были проведены расчеты, в которых пористый Al был заменен на сплошной Al 2024. На рис. 5 показаны зависимости  $v(t)$  в точке  $h_3 = 6$  мм для сплошного Al 2024 при тех же скоростях удара  $v_p$ , что и на рис. 2. Из сравнения следует, что наличие пористости приводит к существенному (в 2–3 раза) уменьшению скорости УВ.

На рис. 6–8 показаны зависимости главного напряжения  $\sigma_1$  скорости и пористости от координаты  $x$  на пять моментов времени при  $v_p = 0,244$  мм/мкс,  $m_1^0 = 0,223$  и  $t$ , мкс: 1 — 0, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 3, 5 — 4. Видно, что к моменту  $t = 1$  мкс в результате распада разрыва в пористом Al формируется УВ, которая в дальнейшем значительно ослабляется волнами разрежения, отраженными от тыльной поверхности ударника и догоняющими УВ. (Скорость волны разгрузки в пористом материале существенно больше скорости УВ. Это связано с тем, что в УВ происходит пластическое затекание пор, а в волне разгрузки пористость остается постоянной.)

Ослабление УВ отражается на зависимости  $m_1(x)$ , которая приобретает характерный ступенчатый вид (уменьшение давления в УВ ведет к увеличению остаточной пористости). После выхода УВ на контактную поверхность Al — кварц, она отражается в Al волной сжатия, в которой

происходит полное затекание пор.

«Размазывание» УВ в кварце связано с увеличением ширины УВ в пористом Al и скачком скорости звука при переходе из пористого Al в кварц. Ширина фронта УВ волны в пористом Al определяется временем затекания пор и в несколько раз больше, чем в сплошном Al. Волны сжатия, выходящие на контактную границу пористый Al — кварц чуть раньше, «уходят» в кварце далеко вперед, что приводит к дополнительному увеличению ширины УВ.

Таким образом наличие пористости приводит к существенному уменьшению скорости УВ и увеличению ширины ее фронта по сравнению с УВ в сплошном материале. Скорость УВ в пористом теле значительно меньше скорости волны разрежения, в результате чего происходит быстрое затухание УВ.

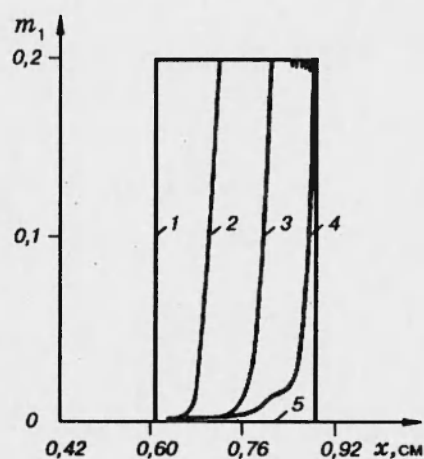


Рис. 8.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шермергор Т. Д. Теория упругости микroneоднородных сред. М.: Наука, 1977.
2. Ударно-волновые процессы в двухкомпонентных и двухфазных средах / С. П. Киселев, Г. А. Руев, А. П. Трунев и др. Новосибирск: ВО Наука, 1992.
3. Киселев С. П., Фомин В. М. О модели пористого материала с учетом пластической зоны, возникающей в окрестности поры // ПМТФ. 1993. № 6. С. 125-133.
4. Киселев С. П. Численное моделирование распространения упругопластических волн в пористом материале. Новосибирск. 1994. (Препр. / РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т теор. и прикл. механики; № 6).
5. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212-264.
6. Butcher V. M., Carrol M. M., Holt A. C. Shock-wave compaction of porous aluminum // J. Appl. Phys. 1974. V. 45, N 9. P. 3864-3875.
7. Lundergan C. D., Herrman W. Equation of state of 6061-T6 aluminum at low pressures // J. Appl. Phys. 1963. V. 34, N 7. P. 2046-2052.
8. Мак-Куин Р., Марш С., Тейлор Дж. и др. Уравнение состояния твердых тел по результатам исследований ударных волн // Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1973. С. 299-427.
9. Barker L. M., Hollenbach R. E. Shock-wave studies of PMMA, fused silica, and sapphire // J. Appl. Phys. 1970. V. 44, N 10. P. 4208-4226.
10. Linde R. K., Seaman L., Shmidt D. N. Shock response of porous copper, iron, tungsten and polyurethane // J. Appl. Phys. 1972. V. 43, N 8. P. 3367-3375.

Поступила в редакцию 10/II 1994 г.,  
в окончательном варианте — 2/II 1995 г.