

ОБ УДАРНОМ СЖАТИИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю. А. Крысанов, С. А. Новиков
(Москва)

Пористые материалы (спеченные металлические порошки, пенопласты) — сложные механические структуры. При их ударно-волновом нагружении в области давлений, в которой проявляются их прочностные свойства, наблюдаются некоторые характерные особенности.

Проведенное в [1] исследование ударного сжатия пенополистирола показало наличие в нем двух стационарных ударных волн (УВ), за которыми следует нестационарная волна пластического сжатия. При движении по образцу двухволновой системы амплитуда и скорость УВ остаются неизменными и зависят только от относительной плотности пенополистирола. Аналогичная сложная волновая структура с двумя стационарными УВ обнаружена в образцах из спеченных медных порошков [2, 3].

В настоящей работе при едином методическом подходе проанализированы экспериментальные результаты для пенополистирола [1] и ряда спеченных металлов: меди, алюминия, вольфрама и бериллия [4—20]. Существуют различные подходы к выводу аналитических зависимостей механических характеристик пористых материалов от относительной плотности d , равной отношению плотности пористого материала к плотности материала матрицы. Для этих целей применяются, например, результаты теоретических исследований композиционных материалов, содержащих твердые включения, по форме близкие к сферической, так как обращение в нуль упругих характеристик включений позволяет распространить результаты этих работ и на пористые материалы. В [4—9] изучение упругих характеристик композиционных материалов проведено с использованием вариационных принципов линейной теории упругости. Получены оценки эффективных упругих модулей для различных моделей структур пористого материала. Из этих работ надо выделить [9], где получены аналитические выражения для модулей сдвига и объемного сжатия пористых материалов, используя которые можно найти зависимость скорости распространения колебаний в бесконечной пористой среде.

В [10] зависимость относительной плотности изделий из металлических порошков от давления прессования предложена в виде степенной функции. Этот подход использован позднее в [11, 12]. На различные механизмы деформации стенок ячеек пенопласта в зависимости от его относительной плотности указывается в [13].

Представим изотропное пористое тело в виде совокупности элементарных ячеек, границы которых показаны на рис. 1 штриховыми линиями. Наиболее очевидно такое представление для пористых тел типа пенополистирола. Спеченные порошки предполагаются состоящими из частиц, имеющих акустический контакт и образующих ячейки типа показанных на рис. 1. Упругие возмущения распространяются по некоторому извилистому пути, образованному поверхностями элементарных ячеек (сплошная линия на рис. 1). Введем следующие обозначения: v_0 — средний размер одной поры, N — число пор в единичном объеме пористого тела, v_1 — средний объем элементарной ячейки пористого тела, v_2 — объем сплошного тела в элементарной ячейке пористого тела. Отметим, что $v_2 = \lim v_1$ при $v_0 \rightarrow 0$. Если представить пористое тело в виде куба единичного объема, то $v_0 = (1 - d)/N$, $v_1 = 1/N$, $v_2 = (1 - Nv_0)/N = d/N$. Полная площадь поверхности элементарных ячеек пористого тела $S = Nv_1^{2/3} = N^{1/3}$ (здесь и далее численные множители, определяемые выбором формы ячейки, не учитываются, так как в процессе расчета они сокращаются).

Для пористого образца вдоль произвольной прямой отношение суммарной длины отрезков прямой, проходящей по сплошному материалу, к линейному размеру образца в этом направлении равно относительной плотности. Если число пересечений прямой с элементарными ячейками сплошного тела $n = d/v_2^{1/3} = d^{2/3}N^{1/3}$, то площадь одной такой поверхности $S_2 = S/n = d^{-2/3}$. Средний путь распространения возмущений в пористом теле $l = S^{1/2} = d^{-1/3}$, скорость распространения возмущений по среднему пути $c = c_0 d^{1/3}$ (c_0 — скорость распространения возмущений в сплошном теле). Характерное время нагружения для анализируемых ниже экспериментов составляло величину порядка нескольких микросекунд, т. е. длина волны несколько миллиметров, что значительно больше толщины перемычек между элементарными ячейками пористых материалов. Поэтому

в рассуждениях пренебрегается эффектами дисперсии скорости распространения возмущений. Если учесть кратчайший путь h распространения слабых возмущений (отрезок A_1A_2), то $hw_0^{1/3} = d(1-d)^{-1}$. Тогда $l = [h^2 + (v_1^{1/3} - v_0^{1/3})^2]^{1/2}$, $h/l = \{1 + d^{-2}(1-d)^{4/3}[1 - (1-d)^{1/3}]^2\}^{-1/2}$ или с учетом того, что $l = d^{-1/3}$, $h = d^{-1/3}\{1 + d^{-2}(1-d)^{4/3}[1 - (1-d)^{1/3}]^2\}^{-1/2}$. Скорость распространения возмущений по кратчайшему пути записывается формулой $c = c_0 d^{1/3}\{1 + d^{-2}(1-d)^{4/3}[1 - (1-d)^{1/3}]^2\}^{-1/2}$.

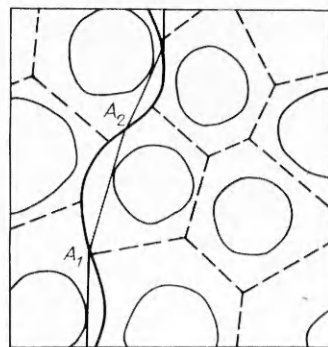
Сделанные выше оценки справедливы лишь для геометрически подобных элементарных объемов v_0 и v_1 , что выполняется для пористых тел с небольшой относительной плотностью. При больших значениях d полученное соотношение может быть неприменимо.

В [1] проведена серия экспериментов с образцами из пористого материала с начальной плотностью в интервале 100... 780 кг/м³. Нагружение образцов осуществлялось стальной пластиной толщиной 0,4 см, разгоняемой взрывом слоя взрывчатого вещества. Начальная скорость пластины ударника изменялась от 40 до 120 м/с. Измерения профили давления системы УВ проводились с помощью пьезокварцевых датчиков давления. При обработке по методу наименьших квадратов зависимости экспериментальных значений параметров УВ от относительной плотности было показано, что для пенопласта плотностью $0 < d < 0,6$ волновая скорость, давление и массовая скорость в первой УВ (D_1, p_1, u_1) описываются степенными зависимостями

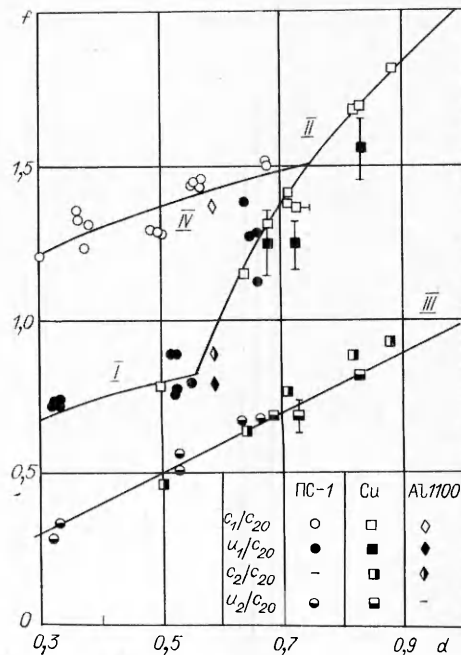
$$Ad^b = \begin{cases} D_1(d), \\ p_1(d), \\ u_1(d). \end{cases}$$

Значения коэффициентов A и b приведены в таблице. Результаты измерений волновой скорости и давления во второй волне (D_2 и p_2) также описываются аналогичной зависимостью. Оказалось, что в пределах ошибки эксперимента массовая скорость во второй волне u_2 не зависит от относительной плотности ($b = 0$) и равна 71 ± 9 м/с.

Результаты этих исследований могут быть использованы для анализа имеющихся данных о поведении в области умеренных давлений ударного сжатия других пористых тел, таких как спеченные металлические порошки. Имеется ряд работ [14—20], в которых представлены результаты экспериментального изучения их ударного сжатия. Полученные результаты и данные других авторов для спеченных алюминия, меди, бериллия и вольфрама приведены на рис. 2 и 3. По оси ординат отложе-



Р и с. 1



Р и с. 2

Параметры первой и второй ударных волн	A	b	Параметры первой и второй ударных волн	A	b
D_1 , м/с	1170+50	0,34+0,02	D_2 , м/с	1180+49	1
p_1 , МПа	68,6+2,8	1,84+0,03	p_2 , МПа	127,3+11,2	1,91+0,07
u_1 , м/с	54+3	0,49+0,04			

ны значения скоростей звука и УВ, отнесенные к скорости распространения сдвиговых колебаний в сплошном материале f , а по оси абсцисс — значения относительной плотности d . При этом поведение упругих характеристик пористого материала, меди и алюминия можно описать едиными кривыми, так как для них отношение c_{10}/c_{20} практически одинаково (рис. 2).

Данные для вольфрама и бериллия представлены на рис. 3. Кривая *I* на этих рисунках представляет собой зависимость $f(d) = d^{1/3}$ и описывает изменение безразмерной скорости первой УВ при $d < 0,6$, *II* — зависимость безразмерной скорости распространения продольных упругих колебаний, полученную из аналитических выражений для эффективных упругих модулей [14], *III* — зависимость $f(d) = d$ и описывает изменение безразмерной скорости второй УВ, *IV* — полученную выше зависимость $f(d) = d^{1/3} \{1 + d^{-2} (1 - d)^{1/3} [1 - (1 - d)^{1/2}]^2\}^{1/2}$ и описывает изменение безразмерной скорости распространения продольных ультразвуковых колебаний.

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов показывает их хорошее согласие. При этом наблюдаются некоторые характерные закономерности, объединяющие пористый материал и спеченные металлы по их реакции на ударное нагружение.

Скорость распространения продольных упругих колебаний является максимальной скоростью распространения возмущений. Первая УВ имеет скорость, заметно меньшую при $d < 0,6$, и приближается к скорости упругих колебаний при $d > 0,6$. Вторая УВ наблюдалась в диапазоне $d = 0,1 \dots 0,8$, скорость ее распространения линейно зависит от относительной плотности.

В [15], где для пористого алюминия при $d = 0,58$ определялись гюгониевский упругий предел и предел прочности при квазистатическом сжатии, они оказались равными. Для больших значений d экспериментальные данные отсутствуют. Некоторые указания на возможность зависимости упругого предела Гюгонио от скорости нагружения есть в [12].

Обратимся к экспериментальным данным по ультразвуковым исследованиям и квазистатическому и ударному нагружению пористых образцов

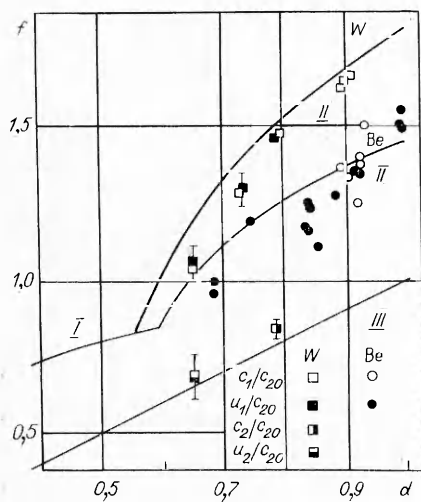


Рис. 3

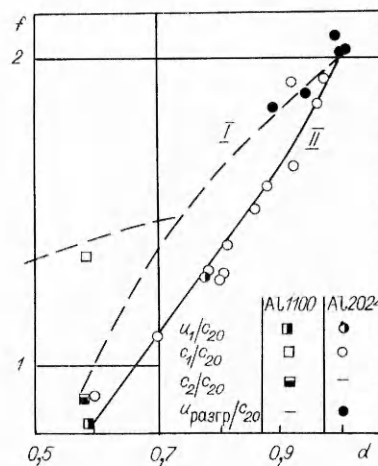


Рис. 4

из алюминиевого сплава Al2024, полученных методом горячего прессования порошка [21—23]. Как было отмечено в [22], в момент прессования происходит отжиг материала. Исследование процесса отжига аналогичного алюминиевого сплава показало, что на границах частиц образуются слои интерметаллических включений, заметно влияющие на механические свойства образцов. Таким образом, пористый алюминиевый сплав надо рассматривать как трехфазную систему (алюминиевый сплав, интерметаллические включения и пустота). Использование результатов [14] для трехфазной системы затруднительно, так как информация о механических характеристиках и объемном содержании включений неопределенна. Однако можно попытаться описать поведение пористого алюминиевого сплава Al2024 в рамках двухфазной системы, используя тот факт, что интерметаллические включения имеют вид тонких слоев на границе контакта частиц алюминиевого сплава.

Экспериментальные данные, относящиеся к алюминиевому сплаву Al2024, приведены на рис. 4. Там же для сравнения приведены данные для практически чистого алюминия Al1100, образцы из которого получены по той же технологии [15]. Как видно на рис. 4, для описания зависимости скорости распространения продольных колебаний от относительной плотности необходимо принять значение эффективной скорости распространения сдвиговых колебаний равным 2,3 км/с (кривая II). В пользу предположения о наличии прослоек между частицами Al2024 свидетельствует следующий экспериментальный факт. Скорость распространения волны разгрузки 3,16 км/с по ударно-сжатому образцу хорошо согласуется с кривой I, полученной для табличного значения скорости распространения сдвиговых колебаний, что объясняется разрушением интерметаллических прослоек при прохождении УВ.

Роль интерметаллических включений особенно наглядна при сравнении упругих характеристик образцов из Al1100 и Al2024 при близких значениях относительной плотности ($d \approx 0,6$). Хотя значения скорости распространения продольных и сдвиговых колебаний для сплошных образцов из этих материалов практически одинаковые, соответствующие значения для $d \approx 0,6$ резко отличаются. Следует также отметить, что оценки зависимости скорости распространения продольных колебаний от относительной плотности, рассчитанные по экспериментально измеренному модулю упругости при квазистатическом сжатии, хорошо согласуются с результатами прямых измерений.

Можно ожидать, что рассмотренное поведение пористого Al2024 характерно для пористых многофазных материалов с аналогичным распределением примесей. Проведенное выше сравнение поведения пористых материалов и спеченных металлических порошков при ударном нагружении показывает, что оно подчиняется одним и тем же закономерностям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бодренко С. И., Крысанов Ю. А., Новиков С. А. Исследование распространения ударных волн в пористом материале // ПМТФ.— 1979.— № 6.
2. Boade R. R. Compression of porous copper by shock // J. Appl. Phys.— 1968.— V. 39, N 12.
3. Linde R. K., Seaman L., Schmidt D. N. Shock response of porous copper, iron, tungsten and polyurethane // J. Appl. Phys.— 1972.— V. 43, N 8.
4. Paul B. Prediction of elastic constants of multiphase materials // Trans. Met. Soc. AIME.— 1960.— V. 218, N 2.
5. Hashin Z. The elastic moduli of heterogeneous materials // J. Appl. Phys.— 1962.— V. 33, N 2.
6. Mackenzie J. E. The elastic constants of solid containing spherical hobs // Proc. Phys. Soc. London, B.— 1950.— V. 63, N 2.
7. Kerner E. H. The elastic and thermo-elastic properties of composite media // Proc. Phys. Soc. London, B.— 1956.— V. 69, N 8.
8. Кристенсен Р. Введение в механику композитов.— М.: Мир, 1982.
9. Budiansky B. On the elastic moduli of some heterogeneous materials // J. Mech. Phys. Soc.— 1965.— V. 13, N 4.
10. Бальшин М. Ю. Зависимость механических свойств порошковых металлов от по-

- ристости и предельные свойства металлокерамических материалов // ДАН СССР.— 1949.— Т. 67, № 5.
11. Панин Б. И., Попов В. А. и др. Механические свойства пенопластов, определяющие работоспособность в качестве силовых заполнителей // Пласт. массы.— 1963.— № 12.
 12. Хуане П. С. Снижение прочности хрупких пористых тел // ПМ.— 1965.— № 1.
 13. Кац М. О модуле упругости материалов с ячеисто-пористой структурой // Пробл. прочности.— 1972.— № 3.
 14. Херрман В. Определяющие уравнения состояния уплотняющихся пористых материалов // Проблемы теории прочности.— М.: Мир, 1976.— Вып. 7.
 15. Asay J. R. Shock and release behavior in porous 1100 aluminium // J. Appl. Phys.— 1975.— V. 46, N 1.
 16. Boade R. R. Dynamic compression of porous tungsten // J. Appl. Phys.— 1969.— V. 40, N 9.
 17. Dundekar D. R., Lamothe R. M. Behavior of porous tungsten under shock compression at a room temperature // J. Appl. Phys.— 1977.— V. 48, N 7.
 18. Buch A., Goldschmidt S. Influence of porosity on elastic moduli of sintered materials // Mater. Sci. Engng.— 1969/70.— V. 4, N 5.
 19. Eden G., Smith C. R. Elastic-plastic behavior of porous beryllium // Proc. 5th Intern. Sympos. on Detonation, Pasadena, Calif., 1970.— Arlington, 1970.
 20. Schock R. N., Aleg A. E., Duba A. Quasistatic deformation of porous beryllium and aluminium // J. Appl. Phys.— 1976.— V. 47, N 1.
 21. LASL shock Hugoniot data // Ed. S. P. Marsh.— Berkeley; Los Angeles; London: University of Calif. Press, 1980.
 22. Butcher B. M., Carroll M. M., Holt A. C. Shock-wave compaction of porous aluminium // J. Appl. Phys.— 1974.— V. 45, N 9.
 23. Butcher B. M. Dynamic response of partially compacted porous aluminium during unloading // J. Appl. Phys.— 1973.— V. 44, N 10.

Поступила 22/IX 1987 г.

УДК 539.63 : 537.311.3

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ КРЕМНИЯ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

С. Д. Гилев, А. М. Трубачев

(Новосибирск)

Изучение фазовых переходов диэлектрик (полупроводник)— металл посредством регистрации электропроводности представляет большой интерес для физики ударных волн (УВ) и физики твердого тела. Проблема измерения проводимости в УВ поставлена более двадцати лет назад и обсуждалась многими авторами [1—4]. Трудности решения данной задачи связаны с тем, что в условиях ударно-волнового нагружения проводимость вещества за доли микросекунды изменяется на много порядков и достигает проводимости классических металлов. Измерению проводимости в таких условиях посвящены работы [5—11].

Наибольшее применение получил метод измерения с использованием шунта, присоединенного параллельно исследуемому образцу [5—9]. Шунт служит для включения тока в силовой цепи и ограничения диапазона изменения напряжения на измерительной ячейке. Однако пространственное разделение образца и шунта приводит к большой инерционности измерительной схемы, что делает определение высокой проводимости ($\sigma > 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$) весьма трудным. В настоящее время надежно зарегистрированы $\sigma \approx 10^4\text{—}10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

В данной работе предлагается усовершенствованная схема измерения высокой проводимости и методика обработки экспериментальных данных, которая обеспечивает наносекундное временное разрешение и поднимает верхнюю границу измеряемых σ до $10^6\text{—}10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Определена зависимость электропроводности от давления для сплошного и пористого кремния в условиях однократного и многократного сжатия в диапазоне интенсивностей УВ 7—20 ГПа.

1. На рис. 1, а приведена электротехническая схема измерения электропроводности при фазовых переходах диэлектрик (полупроводник)— металл. Она включает в себя источник питания (ИП), шунт и исследуемый образец. В начальный момент времени сопротивление образца велико и практически весь ток протекает через шунт. С выходом УВ на образец его сопротивление становится сравнимым с сопротивлением шунта, ток I в цепи шунт — образец перераспределяется с характерным временем

$$(1.1) \quad \tau \sim (L_{\text{ш}} + L_x)/(R_{\text{ш}} + R_x).$$