

## УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследование свойств вещества в экстремальных условиях ударно-волнового нагружения вызвало существенный интерес к анализу упругих характеристик пористых материалов [1]. Важность изучения скоростей упругих волн и модулей упругости пористых сред определяется также задачами конструирования новых композиционных материалов, пригодных к использованию в условиях высоких давлений, температур, переменных механических полей [2, 3]. Описание свойств пористых тел обычно осуществлялось в рамках механики сплошной среды с помощью построения геометрических моделей структуры [4]. В настоящей работе поведение упругих характеристик пористых материалов исследуется с привлечением полуэмпирического уравнения Морзе для энергии деформированного тела.

Используя зависимость внутренней энергии от объема  $V$ , задаваемую формулой Морзе [5], адиабатический модуль всестороннего сжатия  $B$  запишем в виде

$$B = \frac{B_0}{\alpha} x^{1/3} \{2(x^{-1/3} + \alpha) \exp 2\alpha(1 - x^{1/3}) - (2x^{-1/3} + \alpha) \exp \alpha(1 - x^{1/3})\},$$

где  $x = V_0/V$ ;  $B_0$  и  $V_0$  — модуль и удельный объем свободного материала. Параметр  $\alpha$ , характеризующий силы межатомного отталкивания и притяжения, был определен в [5] по энергии и модулю  $B$  в недеформированном состоянии. В соответствии с предлагаемым подходом упругие характеристики пористого тела рассматривались как параметры эффективной среды, получаемой в результате всестороннего растяжения свободного компактного вещества силами отталкивания до плотности, соответствующей пористому материалу. Вводя пористость как  $P = (V - V_0)/V$ , для упругого модуля имеем выражение

$$(1) \quad B(P) = \frac{B_0}{1 + \alpha} y(y + \alpha) \exp 2\alpha(1 - 1/y)$$

( $y = (1 - P)^{1/3}$ ). Уравнение (1) позволило найти соотношение для скорости объемных волн  $C_B$ :

$$(2) \quad C_B(P) = C_{B0} \left\{ \frac{y + \alpha}{(1 + \alpha)y^2} \exp 2\alpha(1 - 1/y) \right\}^{1/2}$$

( $C_{B0}$  — значение  $C_B$  при  $P = 0$ ). Отметим, что  $C_B$  представляет интерес как первое слагаемое в разложении скорости ударной волны по массовой скорости в веществе [6]. По формулам (1) и (2) проведены расчеты скоростей  $C_B$  и модулей  $B$  для пористого железа. Применявшиеся в расчете значения параметра  $\alpha$  из [5] и модуля  $B_0$  из [7] приведены в таблице. Результаты расчетов представлены линиями на рис. 1, б и 2, б.

Материал	$\alpha$	$B_0$	$E_0$	$\nu_0$
		ГПа		
Fe	3,64	166	211	82
Ti	3,28	107	114	43
Co	3,64	190	215	82
Ni	3,60	183	221	86
Cu	3,60	137	128	48
Mo	4,16	263	320	125
W	3,96	310	409	160
MgO	3,72	159	307	130

Для проверки адекватности использованного подхода были проведены ультразвуковые измерения продольной  $C_l$  и поперечной  $C_t$  скоростей упругих волн. Образцы для исследований имели вид цилиндров диаметром 10 мм и высотой 15 мм и изготовлялись из железного порошка марки ПЖРВ2 со средним размером частиц 81 мкм путем прессования и спекания в вакууме при 1450 К. Пористость образцов задавалась в интер-

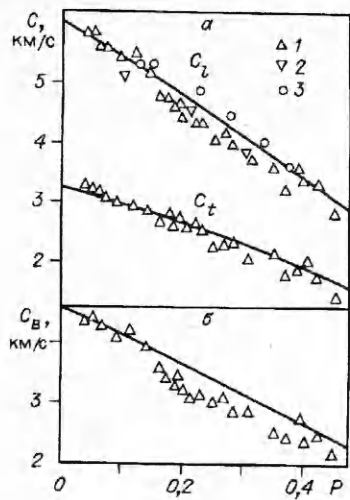


Рис. 1

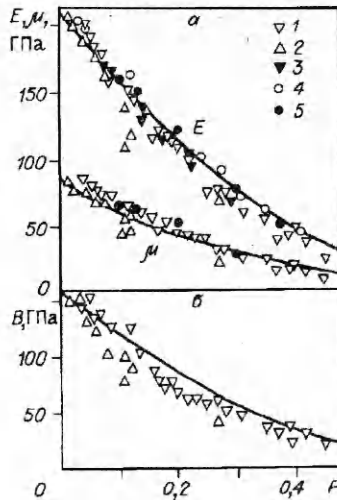


Рис. 2

вале от 4 до 45 %. Средние размеры  $a$  пор, выступающих в качестве основных рассеивающих центров, измерялись на оптическом микроскопе НЕОРНОТ-32 и монотонно увеличивались от  $a = 7$  мкм при  $P = 5$  % до  $a = 16$  мкм при  $P = 40$  %.

Измерения проводились фазово-интерференционным методом с раздельно-совмещенными пьезопреобразователями [8]. Скорости ультразвука определялись путем автоматизированного анализа сдвига фаз излученного и принятого сигналов. Частота ультразвукового сигнала составляла  $f = 2,5$  МГц, что соответствовало случаю  $ka = (2\pi f/C) a \ll 1$ . На образцах компактного армо-железа ( $P = 0$ ) ошибка измерений  $C_{10}$  и  $C_{10}$  не превышала 1 %.

При увеличении пористости возможна существенная дисперсия упругих волн, обусловленная возрастанием концентрации и размеров пор. Относительный вклад дисперсии в скорость ультразвука оценивался согласно [9] как  $C_{10} P (ka)^2 / C_L$ . Экспериментальные значения вклада изменялись от 0,002 % при  $P = 5$  % до 0,35 % при  $P = 40$  %.

Измеренные значения скоростей ультразвуковых волн приведены на рис. 1, а (точки 1), где представлены и опытные данные: 2 — [10] и 3 — [11]. Значения скоростей объемных волн находились по формуле

$$C_B = (C_L^2 - 4C_T^2/3)^{1/2}$$

(рис. 1, б). Наблюдалось монотонное уменьшение скоростей при росте пористости.

Измеренные скорости ультразвука дали возможность определить зависимости упругих характеристик пористого железа от  $P$ . Опытные значения модуля всестороннего сжатия  $B$ , модуля Юнга  $E$  и модуля сдвига  $\mu$  находились по формулам

$$B = (C_L^2 - 4C_T^2)/3V, \quad E = (3C_L^2 - 4C_T^2) C_L^2 / (C_L^2 - C_T^2) V, \quad \mu = C_T^2 / V.$$

Результаты измерений приведены на рис. 2 (точки 1), где представлены экспериментальные данные: 2 — [12], 3 — [13], 4 — [14], 5 — [15].

Особая трудность — измерение такой чувствительной характеристики, как коэффициент Пуассона  $\nu$  [14]. Модельные теоретические представления [4, 14] свидетельствуют об уменьшении  $\nu$  при росте  $P$ , в то же время экспериментальные результаты достаточно противоречивы [15, 16]. В настоящей работе опытные значения  $\nu$  определялись по измеренным скоростям ультразвука по формуле

$$\nu = (C_L^2 - 2C_T^2) / 2(C_L^2 - C_T^2)$$

и приведены на рис. 3, б (точки 1), где точки 2 отвечают данным [12], 3 — [14], 4 — [15]. В целом наблюдалось слабое уменьшение  $\nu$  при возрастании

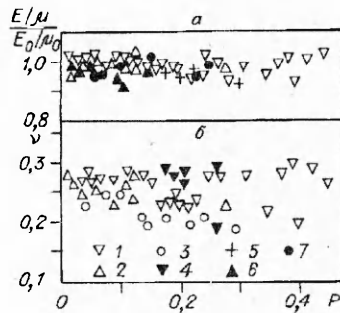


Рис. 3

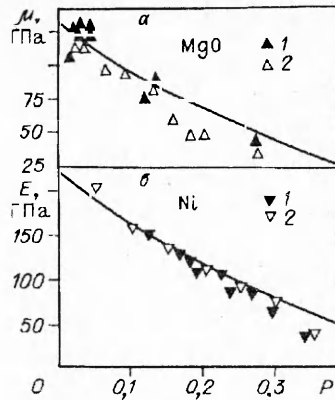


Рис. 4

$P$ . При измерениях значение  $\nu$  обычно находится по модулям  $E$  и  $\mu$  с помощью формулы  $\nu = E/2\mu - 1$  [14, 16]. Поэтому для более надежного анализа коэффициента Пуассона было определено для ряда материалов опытное отношение  $(E/\mu)/(E_0/\mu_0)$ , где  $E_0$  и  $\mu_0$  — характеристики компактного состояния из [7], представленные в таблице. Полученные результаты приведены на рис. 3, *a* для железа, меди (5 — [14]), молибдена (6 — [17]) и вольфрама (7 — [17]). Как видно из рис. 3, изменение пористости весьма слабо влияет на это отношение. Приведенные данные свидетельствуют о допустимости предположения о независимости коэффициента Пуассона от пористости при оценке механических свойств пористых материалов.

При использовании указанного предположения модули  $E$  и  $\mu$  могут быть рассчитаны аналогично модулю  $B$  на основе выражения (1), а скорости  $C_l$  и  $C_t$  — аналогично  $C_B$  с помощью (2). Результаты вычислений для железа представлены линиями на рис. 1, *a* и 2, *a*.

Наблюдаемое согласие с опытными данными позволило применить предложенный подход к широкому классу пористых материалов. Необходимые для расчетов параметры  $\alpha$  и упругие характеристики приведены в таблице для Ti, Ni, Co, Cu, Mo, W и MgO по [5, 7, 18]. В качестве типичных результатов на рис. 4, *b* линией представлена зависимость модуля Юнга пористого никеля от  $P$ , она проходит близко к экспериментальным данным из [19] (точки 1) и [11] (точки 2). На рис. 5 приведены рассчитанные зависимости от пористости относительных модулей сдвига  $\mu/\mu_0$  для титана и молибдена (кривые I и II). Вычисленные значения модулей других металлов располагаются между этими кривыми. Наблюдается тенденция к более сильной зависимости упругих характеристик от пористости для металлов с большим атомным номером, обусловленная увеличением параметра  $\alpha$  при переходе от титана к молибдену и вольфраму. Экспериментальные результаты для ряда металлов практически перекрываются и хорошо накладываются на интервал между кривыми I и II (Fe: точки I — настоящая работа, 2 — [12]; Cu: 3 — [14]; Mo: 4 — [17]; W: 5 — [17]).

Существенный интерес представляет описание пористых керамических материалов. На рис. 4, *a* приведены результаты расчетов модуля сдвига  $\mu$  для окиси магния. Рассчитанная кривая согласуется с опытными данными из [18] (точки 1) и [20] (точки 2). Это свидетельствует о достаточно широкой применимости предложенного подхода к исследованию упругих характеристик пористых материалов.

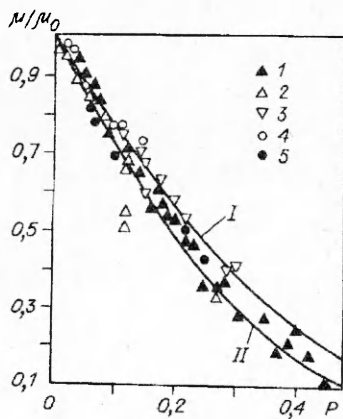


Рис. 5

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Маккуин Р., Марш С., Тейлор Дж. и др. Высокоскоростные ударные явления. — М.: Мир, 1973.
2. Панин В. Е. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. — Новосибирск: Наука, 1990.
3. Приюмер Р. Обработка порошкообразных материалов взрывом. — М.: Мир, 1990.
4. Новиков В. В. К определению эффективных модулей упругости неоднородных материалов // ПМТФ. — 1985. — № 5.
5. Поляков В. В., Щеголев Е. А. К расчету ударных адиабат твердых тел // ПМТФ. — 1982. — № 2.
6. Жданов В. А., Поляков В. В. Ударные адиабаты ионных кристаллов // ФТТ. — 1975. — Т. 17, вып. 11.
7. Swamy K. M., Narayana K. L. Elastic and acoustic properties of isotropic polycrystalline metals // Acoustica. — 1983. — V. 54, N 2.
8. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. — М.: Мир, 1972.
9. Sayers C. M. Ultrasonic velocity dispersion in porous materials // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1981. — V. 14. — P. 413.
10. Степанов Г. В., Зубов В. И. Упругое сжатие пористых металлов // Пробл. прочности. — 1989. — № 6.
11. Роман О. В., Скороход В. В., Фридман Г. П. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. — Минск: Высшейш. шк., 1989.
12. Moon J. P. Elastic moduli of powder metallurgy steels // Powder Met. — 1989. — V. 32, N 2.
13. Скороход В. В. Расчет упругих изотропных модулей дисперсных твердых смесей // Порошковая металлургия. — 1961. — № 1.
14. Бальшин М. Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. — М.: Металлургия, 1972.
15. Griffiths T. J., Ghanizadeh A. Determination of elastic constants for porous sintered iron powder compacts // Powder met. — 1986. — V. 29, N 2.
16. Кашталян Ю. А. Характеристики упругости материалов при высоких температурах. — Киев: Наук. думка, 1970.
17. Баланкин С. А., Башлыков С. С., Бубнов А. С., Скоров Д. М. Влияние пористости на модули упругости вольфрама и молибдена // Изв. АН СССР. Металлы. — 1981. — № 2.
18. Dean E. A., Lopez J. A. Empirical dependence of elastic moduli on porosity for ceramic materials // J. Amer. Ceram. Soc. — 1983. — V. 66, N 5.
19. Cytermann R. Contiguity and properties of porous materials // Fragn. Form and Flow Fract. Media: Proc. 3rd conf., Neve Jean, 1986. — Bristol, 1986.
20. Phani K. L., Niyogi S. K. Elastic modulus-porosity relationship in brittle solids // High Tech. Ceramics: Proc. World Congr. 6 Int. Meet. Mod. Ceram. Technol. — Amsterdam, 1987.

г. Барнаул

Поступила 8/IV 1992 г.,  
в окончательном варианте — 8/XI 1992 г.

УДК 532.529

Т. Р. Аманбаев, А. И. Ивандаев

### ВЛИЯНИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ МЕЛКИХ ЧАСТИЦ С КРУПНЫМИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ДВУХФАЗНЫХ ДВУХФРАКЦИОННЫХ ВЗВЕСЯХ ГАЗА С ЧАСТИЦАМИ

В работе в рамках допущений механики многофазных сред [1] исследуется течение смеси газа с мелкими и крупными частицами, когда взвесь газа и мелких частиц можно считать как односкоростную и однотемпературную сплошную среду со своими особыми теплофизическими свойствами (эффективный газ). Рассматриваются различные способы учета влияния мелких частиц на взаимодействие между эффективным газом и крупными частицами и приводится их сравнительный анализ. Обсуждаются некоторые результаты расчета структур ударных волн (УВ) в газовзвесьях с мелкими и крупными частицами. Структура УВ в монодисперсной газовзвеси инертных частиц изучалась в [2], а в газокapельной смеси (в том числе и в полидисперсной) при наличии фазовых превращений — в [3, 4]. Влияние дробления капель на течение в релаксационной зоне УВ исследовалось в [5],

© Т. Р. Аманбаев, А. И. Ивандаев, 1993