

01;05.1;08

©1994

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ НА СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В МАТАЛЛАХ

В.В.Поляков, А.В.Головин

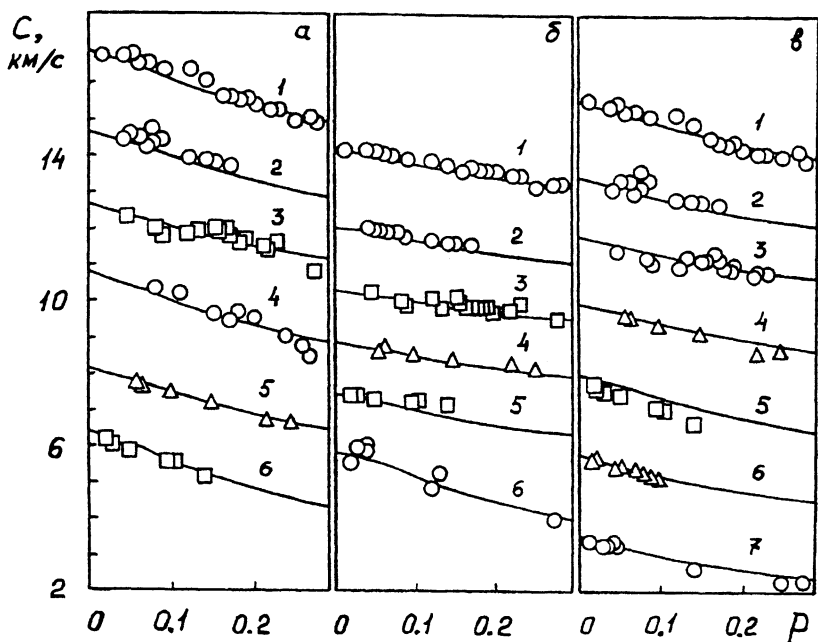
Упругие свойства неоднородных конденсированных сред, примером которых являются композиционные и порошковые материалы, существенно зависят от особенностей структуры. Принципиальный интерес представляет изучение пористых металлов, выступающих как предельный случай гетерофазной среды. Влияние пористой структуры на упругие характеристики этих металлов имеет достаточно сложный и малоизученный характер [1-3]. В настоящей работе проведены экспериментальные и теоретические исследования зависимостей скоростей ультразвуковых волн от степени пористости на примере ряда металлов.

Измерения проводились для образцов из пористых меди, никеля и железа, приготовлявшихся из порошковых пресовок путем спекания в вакууме при температурах 1450 (Ni, Fe) и 1150 К (Cu), степень пористости P при этом давалась в интервале от 3 до 40%. Скорости продольных и поперечных ультразвуковых волн определялись на основе фазово-интерференционного метода согласно [4] на частоте 2.5 МГц, погрешность измерений не превышала для компактных металлов 1.5%.

На рисунке приведены экспериментальные данные для скоростей продольных C_l , поперечных C_t и объемных $C_b = (C_l^2 - \frac{4}{3}C_t^2)^{1/2}$ волн. Там же нанесены опытные данные для других материалов: C_l для Со из [6], C_l , C_t и C_b для W и Mo, вычисленные по опытным модулям упругости из [7]. Для сопоставления на рисунке также представлены имеющиеся опытные данные для пористых керамических материалов: C_t для MgO, вычисленные по модулям сдвига из [8]; C_b для UN и UC, рассчитанные по модулям всестороннего сжатия из [9]. Скорости ультразвука монотонно уменьшаются, что вызвано увеличением концентрации и средних размеров пор, играющих роль основных рассеивающих центров.

Для теоретического анализа экспериментальных данных скорости упругих волн C_l и C_t выражались через модули Юнга E и всестороннего сжатия B :

$$C_l = \left[\frac{3B(E + 3B)}{(9B - E)\rho} \right]^{1/2} \quad C_t = \left[\frac{3BE}{(9B - E)\rho} \right]^{1/2}, \quad (1)$$



Зависимость скоростей продольных (а), и поперечных (б), и объемных (в) ультразвуковых волн от пористости.

а: 1 — Fe ($C_l + 11$ км/с), 2 — Ni ($C_l + 9$ км/с), 3 — Cu ($C_l + 8$ км/с), 4 — Co ($C_l + 5$ км/с), 5 — W ($C_l + 3$ км/с), 6 — Mo (C_l);

б: 1 — Fe ($C_t + 11$ км/с), 2 — Ni ($C_t + 9$ км/с), 3 — Cu ($C_t + 8$ км/с), 4 — W ($C_t + 6$ км/с), 5 — Mo ($C_t + 4$ км/с), 6 — MgO (C_t);

в: 1 — Fe ($C_b + 11$ км/с), 2 — Ni ($C_b + 9$ км/с), 3 — Cu ($C_b + 8$ км/с), 4 — W ($C_b + 6$ км/с), 5 — Mo ($C_b + 3$ км/с), 6 — UN ($C_b + 2$ км/с), 7 — UC (C_b).

где ρ — плотность материала. Зависимость упругих модулей от пористости находилась с помощью структурных моделей. В соответствии с [10] модуль всестороннего сжатия пористого тела записывался как

$$B = \frac{F}{S} \frac{\Delta V}{V}, \quad (2)$$

где F — внешняя сила, S — площадь номинального сечения, $\frac{\Delta V}{V}$ — изменение объема. Характеризующий свойства твердого каркаса модуль компактного материала B_k выражался формулой

$$B_k = \frac{F}{S_{\text{eff}}} \left(\frac{\Delta V}{V} \right)_k. \quad (3)$$

Здесь S_{eff} — эффективное поперечное сечение твердой фазы, определяющее реальное распределение упругих напряжений в каркасе, $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_k$ — изменение объема твердой фазы. Из формул (2) и (3) получаем

$$B = B_k \frac{S_{\text{eff}}}{S} \frac{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_k}{\frac{\Delta V}{V}}. \quad (4)$$

Для относительных объемов использовалось

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_k = \frac{\Delta V}{V} V_V,$$

где $V_V = 1 - P$ — объемная доля твердой фазы [11]. Величина S_{eff} находилась в соответствии с электроакустической аналогией [12] на основе метода элементарной ячейки [13]. В случае изолированных кубических пор можно записать [13,14]

$$S_{\text{eff}}^{(1)}(P, r) = S \left(1 - P^{2/3}\right), \quad (5)$$

для сообщающихся пор с кубической симметрией —

$$S_{\text{eff}}^{(2)}(P, r) = S \left(1 - g(P)\right)^2, \quad (6)$$

где $g(P)$ — действительный корень уравнения $3g^2(P) - 2g^3(P) = P$.

Учтем, что поровое пространство при малых пористостях $P < P_0$ представляет собой систему изолированных поровых кластеров, при $P = P_0$ возникает связный (“бесконечный”) поровый кластер, и при дальнейшем росте P вклад открытой пористости становится доминирующим. В соответствии с этим долю открытой пористости оценим с помощью коэффициента

$$\alpha(P) = \begin{cases} 0, & P \leq P_0 \\ 1 - \frac{P_0}{P}, & P > P_0 \end{cases}, \quad (7)$$

тогда

$$S_{\text{eff}} = \left(1 - \alpha(P)\right) S_{\text{eff}}^{(1)} + \alpha(P) S_{\text{eff}}^{(2)} \quad (8)$$

и окончательно

$$B(P) = B_k(1 - P) \left[\left(1 - \alpha(P)\right) \left(1 - P^{2/3}\right) + \alpha(P) \left(1 - g(P)\right)^2 \right]. \quad (9)$$

В случае модуля Юнга E с учетом основного закона стереологии [11] объемная доля твердой фазы V_V равняется линейной доле L_L и

$$\frac{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)_k}{\frac{\Delta l}{l}} = 1 - P, \quad (10)$$

что позволяет использовать для величины E зависимость такого же вида, как (9). Скорости продольных, поперечных и объемных упругих волн теперь запишутся в виде

$$C = C_k \left[\left(1 - \alpha(P)\right) \left(1 - P^{2/3}\right) + \alpha(P) \left(1 - g(P)\right)^2 \right]^{1/2}. \quad (11)$$

Результаты расчетов по формуле (11) приведены на рисунке. При вычислениях использовались значения C_{lk} и C_{tk} из [15]. Наблюдаемое соответствие с опытными данными свидетельствует об адекватном описании упругих характеристик пористых материалов на основе использованного подхода.

Список литературы

- [1] Moon J.P. // Powder Met. 1989. V. 32. N 2. P. 132-139.
- [2] Баланкин А.С. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 6. С. 84-90.
- [3] Поляков В.В., Алексеев А.Н. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 10. С. 84-87.
- [4] Поляков В.В., Головин А.В. // ПМТФ. 1993. В. 5. С. 32-35.
- [5] Степанов Г.В., Зубов В.И. // Проблемы прочности. 1989. В. 6. С. 36-40.
- [6] Роман О.В., Скороход В.В., Фридман Г.Р. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. Минск, 1989. 182 с.
- [7] Баланкин С.А., Башлыков С.С., Бубнов А.С., Скорое Д.М. // Изв. АН СССР. Металлы. 1981. Т. 2. С. 201-204.
- [8] Phani K.L., Niyogi S.K. // High Tech. Ceramics: Proc. World Congr. 6 Int. Meet. Mod. Ceram. Technol. Amsterdam, 1987. P. 1391-1404.
- [9] Баланкин С.А., Бубнов А.С., Скорое Д.М. // Атомная энергия. 1978. Т. 45. В. 8. С. 220-221.
- [10] Cytermann R. // Fragm. Form and Flow Fract. Media: Proc. of 3 conf., Neve Jean, 1986. Bristol, 1986. P. 458-472.
- [11] Черняевский К.С. Стереология в металловедении. М., 1977. 280 с.
- [12] Хаясака Т. Электроакустика. М., 1982. 248 с.
- [13] Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. Л., 1991. 248 с.
- [14] Поляков В.В., Утемесов М.А., Бондарчук Т.В., Шейда А.П. // Теплофизические свойства веществ. Ч. II. Новосибирск, 1989. С. 267-271.
- [15] Swamy K.M., Narayana K.L. // Acoustica. 1983. V. 54. N 2. P. 123-126.

Алтайский государственный
университет
Барнаул

Поступило в Редакцию
13 марта 1994 г.