

В.В. Поляков, А.В. Егоров, В.А. Турецкий

Модули упругости пористых псевдосплавов

При компьютерном моделировании новых конструкционных материалов большое внимание уделяется прогнозированию их физико-механических свойств. Особенно актуальна эта проблема для композиционных материалов, предназначенных для работы в условиях переменных механических нагрузжений. Как правило, такие материалы обладают резко неоднородной структурой, что приводит к сложной зависимости их свойств от параметров строения. Подобные зависимости достаточно подробно обсуждались в литературе для пористых металлов [1, 2]. Однако в случае пористого псевдосплава, имеющего, как минимум, две металлические компоненты с различающимися свойствами, задача исследования структурно зависимых характеристик существенно усложняется. В настоящей работе предложен подход, позволяющий описать зависимость упругих характеристик пористых псевдосплавов от параметров структуры материала, и проведена его экспериментальная проверка.

Для моделирования упругих характеристик пористых псевдосплавов был использован метод элементарной ячейки, хорошо показавший себя при исследовании пористых металлов [3, 4]. В рамках данного метода модуль Юнга E для пористой среды определяются следующими выражениями:

$$E(P) = E_k \frac{(\Delta L/L)_k S_{eff}}{\Delta L/L S}, \quad (1)$$

где E_k – упругий модуль компактных участков среды; $\Delta L/L$ и $(\Delta L/L)_k$ – относительные изменения линейных размеров пористого материала и его твердой фазы соответственно; S – площадь сечения образца, нормальная к внешней силе; S_{eff} – площадь реально нагруженной поверхности в сечении твердой фазы. Из основного закона стереологии, согласно которому линейная доля фазы равняется ее объемной доле, было получено соотношение:

$$\frac{(\Delta L/L)_k}{\Delta L/L} = 1 - P, \quad (2)$$

где P – пористость материала. Для нахождения сомножителя с эффективным сечением использовался метод обобщенной проводимости с привлечением электроакустической анало-

гии, по которой упругая сила аналогична току, удлинение – разности потенциалов, а упругое сопротивление системы – электрическому сопротивлению. При этом учитывалось, что эффективное сечение в общем случае определяется сложным пространственным распределением упругих напряжений в структурных элементах. Особенности топологического строения пористых псевдосплавов учитывались и при нахождении упругих модулей E_k и B_k твердой фазы, которые зависят не только от упругих свойств веществ, входящих в состав материала, но и от его фазового состава, описываемого объемными концентрациями компонентов C_i

$$C_i = \frac{V_i}{V}, \quad (3)$$

где индекс i – порядковый номер компонента, входящего в состав псевдосплава; V_i – объем, занимаемый соответствующей компонентой; V – общий объем материала.

Данный подход был применен для нахождения зависимостей упругих модулей пористого псевдосплава на основе железа и меди от концентраций исходных компонентов при фиксированной пористости. Используемые при расчетах кубические элементарные ячейки, имеющие линейный размер R , приведены на рисунке 1. Все они соответствуют случаю открытой пористости и учитывают изменение топологии при увеличении концентрации одной из твердых фаз выше 15%, соответствующей порогу перколяции. Линейные размеры структурных элементов r и d , приведенные на рисунке 1, находились по заданным значениям концентраций C_{Fe} и C_{Cu} , которые связаны между собой соотношением

$$C_{Fe} + C_{Cu} + P = 1. \quad (4)$$

Разбиение элементарной ячейки на структурные элементы, представляющие собой компактные области одной фазы, проводили в рамках как «адиабатического», так и «изотермического» приближений. Первое приближение соответствует передаче упругих напряжений только по номинальному сечению твердого каркаса, а второе – распределению этих напряжений по всему каркасу. Модуль Юнга для ячейки, приведенной на рисунке 1а, в случае первого варианта определялся выражением

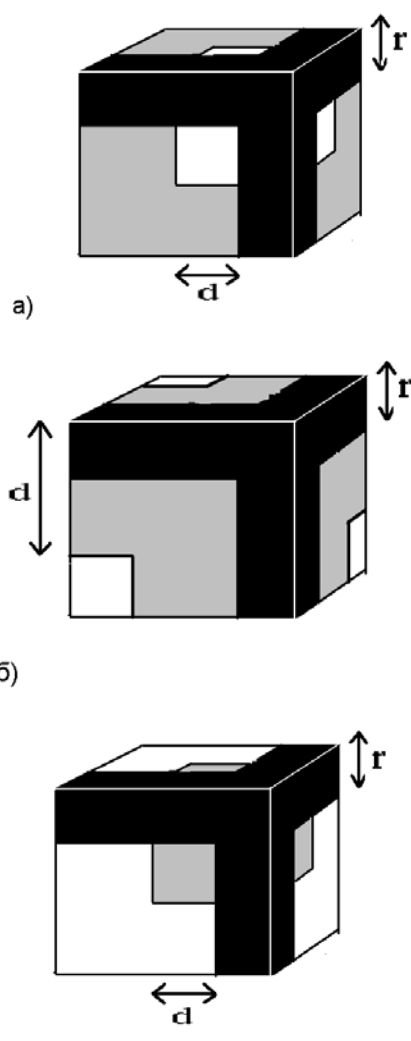


Рис. 1. 1/8 часть элементарной ячейки пористого псевдосплава с открытой пористостью: а) изолированный железный кластер; б) сообщающиеся железный и медный кластеры; в) изолированный медный кластер

$$E^* = E_{Cu}((1-f)^2 - g^2) + \frac{E_{Fe}E_{Cu}g^2}{E_{Cu}(f+g) + E_{Fe}(1-f-g)},$$

а в случае второго – выражением

$$E^* = \left(\frac{\frac{f}{E_{Cu}((1-f)^2 - g^2) + E_{Fe}g^2} + \frac{g}{E_{Cu}(1-(g+f)^2 + E_{Fe}((g+f)^2 - f^2))} + \frac{1-f-g}{E_{Cu}(1-f^2)}} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где $f = r/R$ и $g = d/R$ – относительные размеры структурных элементов, $E = E^*(1-P)$, E_{Fe} и E_{Cu} – модули Юнга компактных железа и меди соответственно. Для ячейки, приведенной на рисунке 1б, эти выражения имели вид

$$E^* = E_{Fe}(1-g)^2 + E_{Cu}(g-f)^2 + \frac{2E_{Fe}E_{Cu}(g-f)(1-g)}{E_{Fe}g - E_{Cu}(1-g)} \quad (7)$$

и

$$E^* = \left(\frac{\frac{f}{E_{Cu}((1-f)^2 - (1-g)^2) + E_{Fe}(1-g)^2} + \frac{g-f}{E_{Cu}(1-f^2 - (1-g)^2) + E_{Fe}(1-g)^2} + \frac{1-g}{E_{Cu}(g^2 - f^2) + E_{Fe}(1-g^2)}} \right)^{-1}, \quad (8)$$

а для ячейки на рисунке 1в –

$$E^* = E_{Cu}((1-f)^2 - g^2) + \frac{E_{Fe}E_{Cu}g^2}{E_{Fe}(f+g) + E_{Cu}(1-f-g)}, \quad (9)$$

и

$$E^* = \left(\frac{\frac{f}{E_{Fe}((1-f)^2 - g^2) + E_{Cu}g^2} + \frac{g}{E_{Fe}(1-(g+f)^2 + E_{Cu}((g+f)^2 - f^2))} + \frac{1-f-g}{E_{Fe}(1-f^2)}} \right)^{-1}. \quad (10)$$

По формулам (6) – (10) были проведены расчеты модуля Юнга для псевдосплава на основе железа и меди с фиксированными пористостями $P = 15\%$ и $P = 25\%$ в широком диапазоне изменения концентрации железного компонента. Результаты расчетов приведены на рисунках 2 и 3 в виде кривых. Повышение модуля упругости с ростом концентрации железного компонента отражает более высокие значения E в компактном железе по сравнению с компактной медью. Теоретические кривые изображены до значений C_{Fe} , соответствующих концентрациям $1-P$ (каркас из железа).

Для проверки предложенного описания были проведены измерения упругих модулей пористых псевдосплавов, изготовленных из порошков железа и меди. Исследованные образцы имели вид цилиндров диаметром 15 мм и высотой

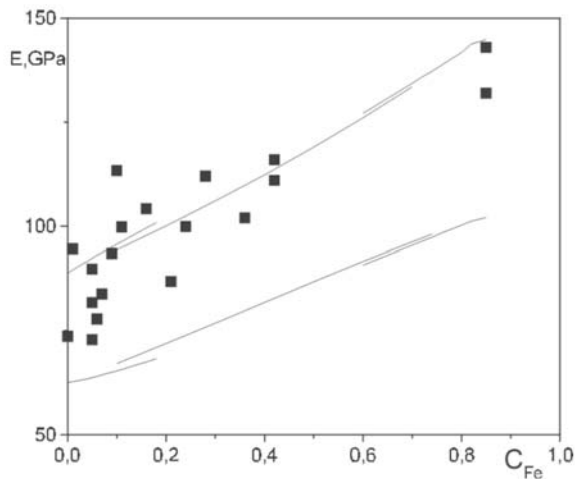


Рис. 2. Модули упругости псевдосплава при $P = 15\%$

4–6 мм, которые были изготовлены путем пресования до требуемой степени пористости и последующего спекания в вакууме при температуре 1100 К в течение 5 часов. Модули Юнга определялись через измеренные значения скоростей продольной C_l и C_t поперечной ультразвуковых волн по следующей формуле:

$$E = \frac{3C_l^2 - 4C_t^2}{C_l^2 - C_t^2} C_t^2 \rho, \quad (11)$$

где ρ – плотность материала. Результаты измерений упругих модулей представлены на рисунках 2 и 3 в виде экспериментальных точек. Большой разброс этих точек обусловлен

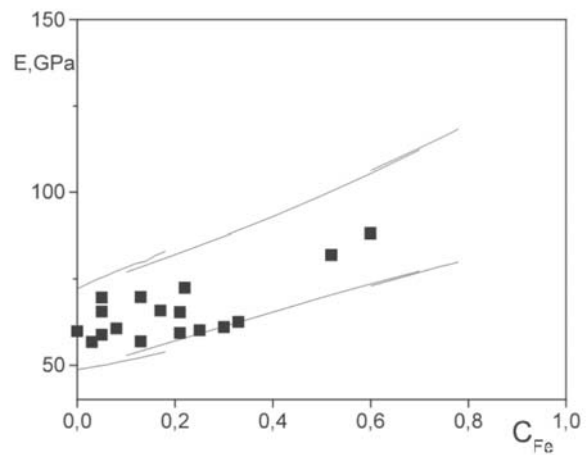


Рис. 3. Модули упругости псевдосплава при $P = 25\%$

крайней неоднородностью структуры образцов, вызывающей значительное изменение в значениях модуля упругости. Видно, что экспериментальные данные качественно соответствуют результатам расчетов. Отметим, что опытные точки для псевдосплавов при пористости 15% располагаются ближе к верхней кривой, а при $P = 25\%$ они приближаются к нижней границе. Этот же результат был получен при исследовании упругих модулей и электропроводностей однокомпонентных пористых металлов.

Полученные результаты могут быть использованы при компьютерном проектировании новых композиционных материалов с заранее заданными механическими свойствами.

Литература

1. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. Л., 1991.
2. Поляков В.В. Моделирование структуры и физико-механических свойств неоднородных конденсированных сред. Барнаул, 2000.
3. Поляков В.В., Турецкий В.А. Влияние струк-

туры на электропроводность пористых псевдосплавов. Известия вузов. Физика. 1999. №7. С. 80–82.

4. Поляков В.В., Турецкий В.А. Зависимость электропроводности псевдосплава Fe-Cu от структуры. Физика металлов и металловедение. 1999. Т. 87. №3. С. 26–29.