

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГОЙ ВОЛНЫ С ПАРАМЕТРАМИ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ МЕДНОГО ПОРОШКА С ВОЛЬФРАМОВЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Ю.Г. БЕЗЫМЯННЫЙ, Т.А. ЕПИФАНЦЕВА, Е.А. КОЗИРАЦКИЙ

*Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины
ул. Кржижановского, 3, Киев, 03142, Украина.*

Экспериментально исследована корреляция скорости распространения упругой волны со структурными особенностями неспеченных порошковых прессовок на основе медной матрицы с вольфрамовыми включениями. Установлены зависимости скорости распространения упругой волны от размеров частиц порошковых компонентов и объемной доли вольфрама в смеси. По экспериментальным значениям скорости распространения продольной упругой волны в исследуемых образцах проведена оценка значений модуля упругости материалов и его сопоставление с модельными представлениями. Полученные результаты позволяют рекомендовать данный метод контроля для отработки структуры и свойств гетерогенных прессовок из порошковых материалов на основе пластичной матрицы и твердых включений.

ВВЕДЕНИЕ

Композиты на основе медного порошка применяются как конструкционные материалы для электрокатодного оборудования. Получение таких материалов с наперед заданными свойствами предполагает в процессе их изготовления контролировать структурные параметры, такие как плотность прессовки, качество контактов, пористость. Эти параметры зависят, в частности, от размеров и процентного содержания включений. В работе проведена оценка корреляции между скоростью распространения упругих волн в образцах из композитов на основе медного порошка с вольфрамовыми включениями и указанными характеристиками материала.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения эксперимента были изготовлены образцы прямоугольной формы из композитов на основе медного порошка с вольфрамовыми включениями. Пористость образцов составляла 23%. Структура материала показана на рис. 1 (x10), структурная модель – на рис. 2 (где 1 – частица меди; 2 – частица вольфрама), форма и размеры образцов – на рис. 3 (стрелками показаны направления прозвучивания в разных точках). Материалы композитов отличались размерами частиц матрицы D_{cu} , а так же размерами D_w и массовой долей Q_w включений (см. табл.). Образцы были разделены на 5 групп смесей. В каждой группе изменялся только один параметр структуры материала.

Скорость распространения упругой волны определялась по времени сквозного прохождения упругого импульса через исследуемый образец. Измерение времени прохождения проводилось методом радиоимпульса с дискретной задержкой [1].

Структурная схема измерений показана на рис. 4. В акустической измерительной камере с помощью специального прижимного устройства между излучающим и приёмным преобразователями устанавливался исследуемый образец. С выхода генератора на излучающий пьезопреобразователь с резонансной частотой 5 МГц

подавалась периодическая последовательность электрических прямоугольных импульсов. Преобразованный сигнал проходил через контактный слой, исследуемый образец, второй контактный слой и поступал на приёмный преобразователь. Далее он трансформировался в электрический сигнал и через усилитель поступал на осциллограф, где, с помощью измерителя временных интервалов, измерялось время задержки $t_{изм}$ между моментом запуска генератора и приходом сигнала на вход осциллографа. Для компенсации систематической погрешности измерения, обусловленной временем прохождения сигнала вне исследуемого образца t_0 , проводились аналогичные измерения при отсутствии образца между пьезопреобразователями.

Табл.



Рис. 1

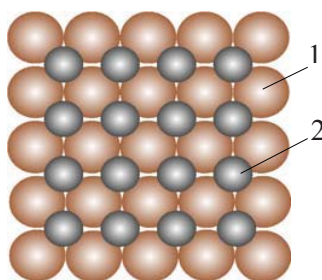


Рис. 2

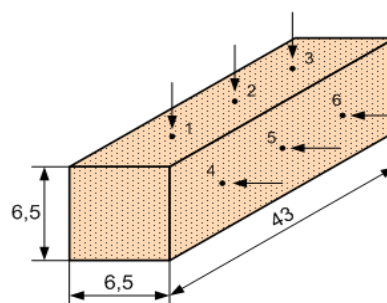


Рис. 3

Группа №	Смесь №	Включения			Скорость, м/с		Модуль упругости E, ГПа
		D_{Cu} , мкм	D_w , мкм	Q_w , мас.%	В направлении прессования	Перпендикулярно направлению прессования	
1	1	+50	15	50	907	1145	81
	2	+50	28	50	957	1248	90
	3	+50	100	50	782	1047	60
2	4	-50	15	50	950	1286	89
	5	-50	28	50	987	1346	96
	6	-50	100	50	845	1139	70
3	7	+50	15	20	737	1097	44
	8	+50	28	20	769	1124	48
	9	+50	100	20	632	979	32
4	10	-50	15	20	737	1097	44
	11	-50	15	50	992	1301	97
5	12	-50	28	20	693	997	39
	13	-50	28	50	987	1292	96

В качестве контактной жидкости применялась вода. Для защиты образца от воздействия контактной жидкости использовалась пленка толщиной 0,13 мм.

Толщина образцов h измерялась микрометром.

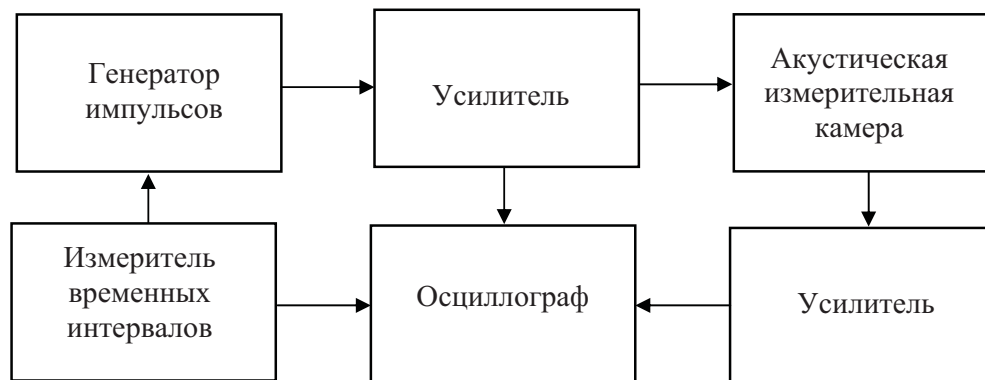


Рис. 4

Скорость распространения упругой волны рассчитывали по формуле:

$$C = \frac{h}{t_{изм} - t_o} \quad (1)$$

Для описанной методики погрешность определения скорости распространения упругой волны в исследуемых образцах составляет не более 0,5 %.

Прозвучивание образцов проводилось в двух направлениях: в направлении прессования и перпендикулярно направлению прессования. Для учёта разброса свойств материала по объёму замеры времени прохождения упругой волны через образец были произведены в трех точках для каждого направления, а скорость для каждого направления определялась по усредненному значению времени. Полученные результаты усреднялись для 3-4 одинаковых образцов. Результаты эксперимента представлены в табл.

На рис. 5 показаны зависимости скорости распространения упругой волны от размера вольфрамовых включений в направлении прессования (а) и перпендикулярном направлении (б) для групп смесей № 1-3 из табл. Соответствующие зависимости от массовой доли включений для групп № 4 и 5 представлены на рис. 6.

На рис. 7 представлены экспериментальные зависимости скорости распространения упругих волн от пористости для 4-х разных составов композитов. Здесь использованы результаты предыдущего эксперимента [2].

2. ОЦЕНКА МОДУЛЯ УПРУГОСТИ

Для вычисления модуля упругости использовались два подхода.

2.1. По экспериментально измеренным эффективным скоростям распространения упругих волн.

В однородной изотропной твёрдой среде связь характеристик упругости (модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν) и плотности ρ материала со скоростью распространения продольной упругой волны определяется известной [3] формулой:

$$E = \frac{C^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (2)$$

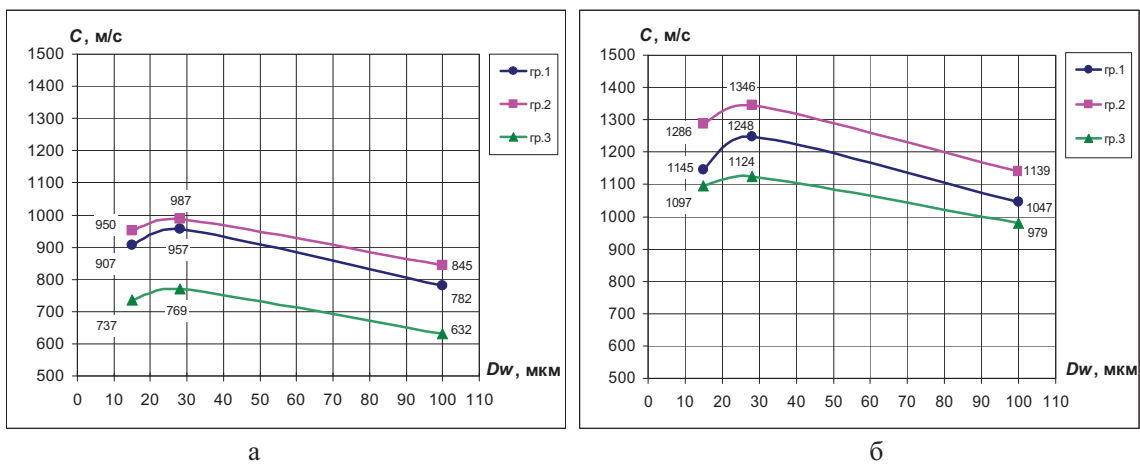


Рис. 5

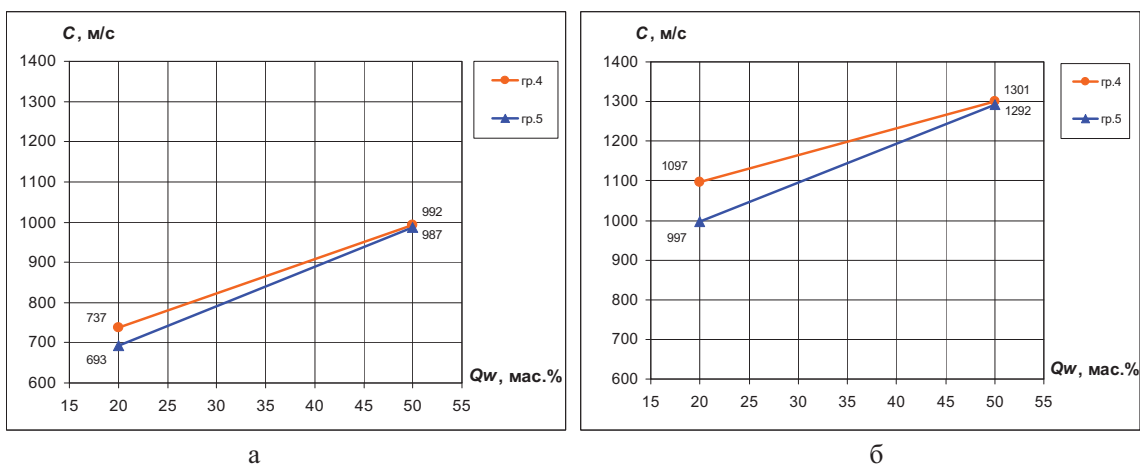
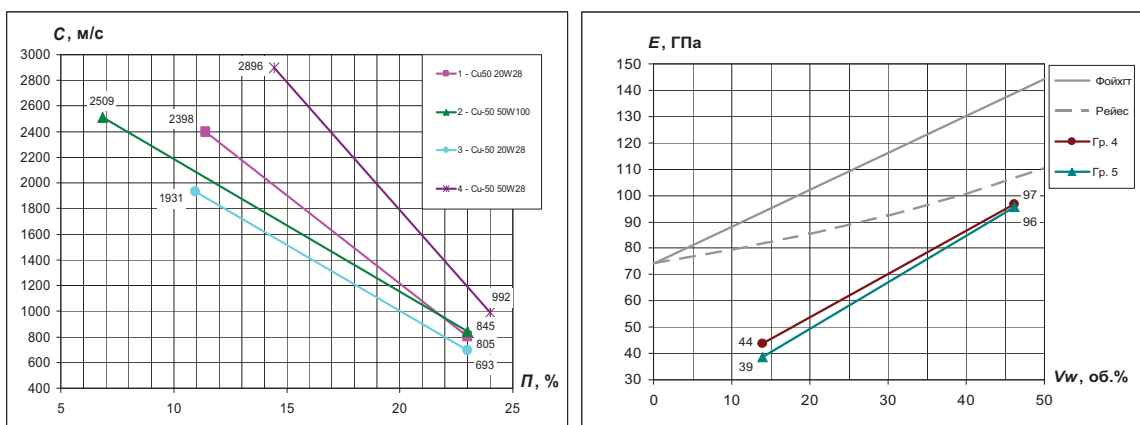


Рис. 6



Формула (2) остаётся справедливой для исследуемых композитов при условии, что входящие в неё величины заменяются их эффективными значениями для

соответствующей среды. При этом для многофазных материалов эффективные значения могут быть найдены по различным методам усреднения. [4]

Эффективное значение скорости распространения упругой волны было найдено в результате эксперимента.

Эффективное значение коэффициента Пуассона как функция пористости θ определяется по формуле [5]:

$$v_{\theta} = v_o(1 - \theta), \quad (3)$$

считая, что для обоих компонентов материала при отсутствии пористости он имеет одинаковое значение – $v_o = 0,35$ [6]. Тогда $v_{\theta} = 0,27$.

Эффективное значение плотности как функция пористости определяется по формуле [5]:

$$\rho_{\theta} = \rho_{\theta o}(1 - \theta), \quad (4)$$

где для двухкомпонентного беспористого материала [6]:

$$\rho_{\theta o} = \frac{\rho_{Cu}\rho_W \cdot 100}{\rho_W Q_{Cu} + \rho_{Cu} Q_W} \quad (5)$$

где Q_{Cu} , Q_W – процентное соотношение компонентов по массе, причём $\rho_{Cu} = 8,96$ г/см³, $\rho_W = 19,32$ г/см³ [6]. В результате расчётов по формулам (5) и (6) смеси № 1-6, 11, 13 имеют плотность $\rho_{\theta} = 12,24$ г/см³; смеси № 7-10 и 12 – 10,04 г/см³.

Для нашего случая получим

$$E_{\theta} \approx 0,8\rho_{\theta} C_{\theta}^2 \quad (6)$$

2.2. По известным модельным представлениям.

В соответствии с [5] зависимость эффективного модуля упругости от пористости определяется по формуле:

$$E_{\theta} = E_{\theta o}(1 - \theta)^2 \approx 0,59E_{\theta o}, \quad (7)$$

Граничные значения $E_{\theta o}$ можно определить по формулам Рейеса и Фойгхта [4] для двухкомпонентного материала:

$$\frac{1}{E_{R\theta o}} = \frac{V_{Cu}}{E_{Cu0}} + \frac{V_W}{E_{W0}}; \quad E_{F\theta o} = V_{Cu}E_{Cu0} + V_W E_{W0} \quad (8)$$

где V_{Cu} , V_W – объемная концентрация соответствующего материала, $E_{Cu0} = 125$ ГПа, $E_{W0} = 362$ ГПа [6].

На рис. 8 показаны функциональные зависимости, полученные по формулам (7) и (8), и экспериментальные значения, полученные по результатам измерения скорости распространения упругой волны с использованием формулы (6) для групп образцов 4 и 5.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

По графикам представленным на рис. 5 и 6 видно, что скорость распространения упругой волны в направлении прессования образца меньше скорости измеренной в перпендикулярном направлении, что подтверждает теорию М.Ю.Бальшина [5] и экспериментальные результаты О.В.Романа с соавторами [7].

Для всех смесей на графиках зависимости скорости распространения упругой волны от размеров включений (рис. 5) имеются экстремумы при размере частиц 28 мкм. Наличие этих экстремумов можно объяснить контактными явлениями в материале прессовок [8].

В исследуемом материале эффективная скорость упругой волны зависит от свойств матрицы и включений, порового пространства и качества контактов. При этом эффективное значение скорости распространения упругой волны C_{ε} как функция свойств материала и его компонентов выражается в следующей форме [8]:

$$C_{\varepsilon} = C_{\varepsilon_0} K_{\Pi} K_K \quad (9)$$

где C_{ε_0} – скорость распространения упругой волны в двухкомпонентном беспористом материале; K_{Π} , K_K – коэффициенты, учитывающие пористость и качество контактов между отдельными элементами мезоструктуры. Поскольку пористость у исследованных материалов одинаковая, а формулы (7) и (8) для расчёта функциональных зависимостей не учитывают контактных явлений в материалах прессовок, то именно влиянием несовершенных контактов можно объяснить существенно меньшие значения экспериментально полученных модулей упругости по сравнению с теоретическими. При этом из рис. 8 видно, что в неспеченных прессовках несовершенные контакты являются определяющими в величине модуля упругости материала.

ВЫВОДЫ

В результате работы выявлена корреляция эффективной скорости распространения упругой волны с параметрами структуры (размеров и процентного содержания частиц, качества контактов между частицами, пористостью) неспеченных прессовок из композитов на основе медного порошка с вольфрамовыми включениями. Полученные результаты позволяют рекомендовать скорость распространения упругой волны как диагностический параметр для отработки структуры и свойств гетерогенных прессовок из порошковых материалов на основе пластичной матрицы и твердых включений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Труэлл Р., Эльбаум, Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972. – 302 с.
2. Исследование влияния состава и структуры на скорость ультразвука в порошковом материале с медной матрицей и вольфрамовыми включениями / Ю.Г.Безымянный, Т.А.Епифанцева, Л.О.Тесленко, Е.А.Козирацкий // Тез. докл. V международ. конф. Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследование, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий: Большая Ялта, Жуковка, 2008. – С. 296.
3. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теория упругости. – М., 1965.
4. Скороход В.В. Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах // Порошковая металлургия. – 1995. – № 1/2. – С.53-70.
5. Бальшин М. Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. – М.: Металлургия, 1972. – 336 с.
6. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
7. Роман О. В., Скороход В. В., Фридман Г. Р. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. – Мн.: Высш. шк., 1989. – 182с.
8. Безымянный Ю. Г. Использование акустических характеристик для контроля структуры пористых материалов // Электронная микроскопия и прочность материалов. – К. – 1999. – С. 93–105.