

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПСЕВДОСПЛАВА Fe-Cu-Mo

Ю.Г. БЕЗЫМЯННЫЙ, Е.А. КОЗИРАЦКИЙ, А.Н. КОЛЕСНИКОВ,
О.И. ГЕТЬМАН, П.Я. РАДЧЕНКО

Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН Украины

В работе представлены результаты исследования процесса формирования псевдосплавов на основе системы Fe-Cu-Mo при разных технологических режимах. Исследования проведены по следующей методологии: анализ образцов материала как объекта акустического контроля, акустическое моделирование, измерение акустических характеристик, определение характеристик упругости, сопоставительный анализ теоретических и экспериментальных результатов. Показано, что корректная постановка акустических исследований позволяет эффективно использовать ультразвуковые методы для отработки технологии формирования многофазных порошковых материалов.

ВВЕДЕНИЕ

Псевдосплавы на основе Fe-Cu применяют в качестве материалов для электрических компонентов устройств, плавких вставок, а также для изготовления деталей, подверженных ударным нагрузкам, что требует от них высокой электропроводности, прочности и пластичности. Такие материалы относятся к системе с ограниченной растворимостью компонентов, поэтому отработка их состава предполагает особое внимание к контролю за изменением свойств в ходе технологического процесса. Такой контроль может быть осуществлён по результатам измерения скоростей распространения упругих волн на разных стадиях изготовления материала.

1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛЬ ЕГО АКУСТИЧЕСКОГО ОТОБРАЖЕНИЯ

Образцы исследуемых материалов (табл. 1) изготовлены методами порошковой металлургии путём прессования в цилиндрической прессформе смеси порошков железа, меди и молибдена с последующим спеканием. Размер исходных порошков находился в пределах от 0,5 до 5,0 мкм. Порошковые смеси были приготовлены методом механического легирования в диспергаторе при совместном помоле промышленных порошков исходных металлов. Массовое соотношение Fe:Cu во всех смесях равно 2,33. Твердофазное спекание спрессованных образцов из приготовленных шихт с пористостью 27 % осуществлено в водороде при температуре 1000 °С. Пористость образцов после спекания находилась в диапазоне 4-6 %. Диаметр образцов составлял 9, а высота 3-4 мм, размер пор не превышал 6 мкм.

На рис. 1 приведена микроструктура образцов с содержанием молибдена 0 (а); 2 (б); 5 (в) и 10 (г) % после спекания в течении 8 час.

По данным рентгенофазового анализа образцов, после спекания молибден полностью растворяется в железе, а для образцов с 10 мас. % Мо, что ниже предела растворимости Мо в Fe, фиксируется слабый пик $Fe_3Mo_{(110)}$, то есть наблюдается выделение интерметаллида. Кроме этого, образуются твердые растворы железа в меди, и

меди в железе. Однако, с увеличением количества молибдена в образцах, в медной фазе растворяется меньшее количество железа [1].

Табл. 1.

№ состава	Состав, мас. %	Плотность, г/см ³				
		Время спекания, час.				
		0	1	2	4	8
1	70Fe-30Cu	7,0	7,2	7,35	7,49	7,68
2	68,6Fe-29,4Cu-2Mo	7,13	7,31	7,41	7,52	7,73
3	66,5Fe-28,5Cu-5Mo	7,32	7,48	7,61	7,74	7,88
4	63Fe-27Cu-10Mo	7,4	7,55	7,73	7,88	8,03

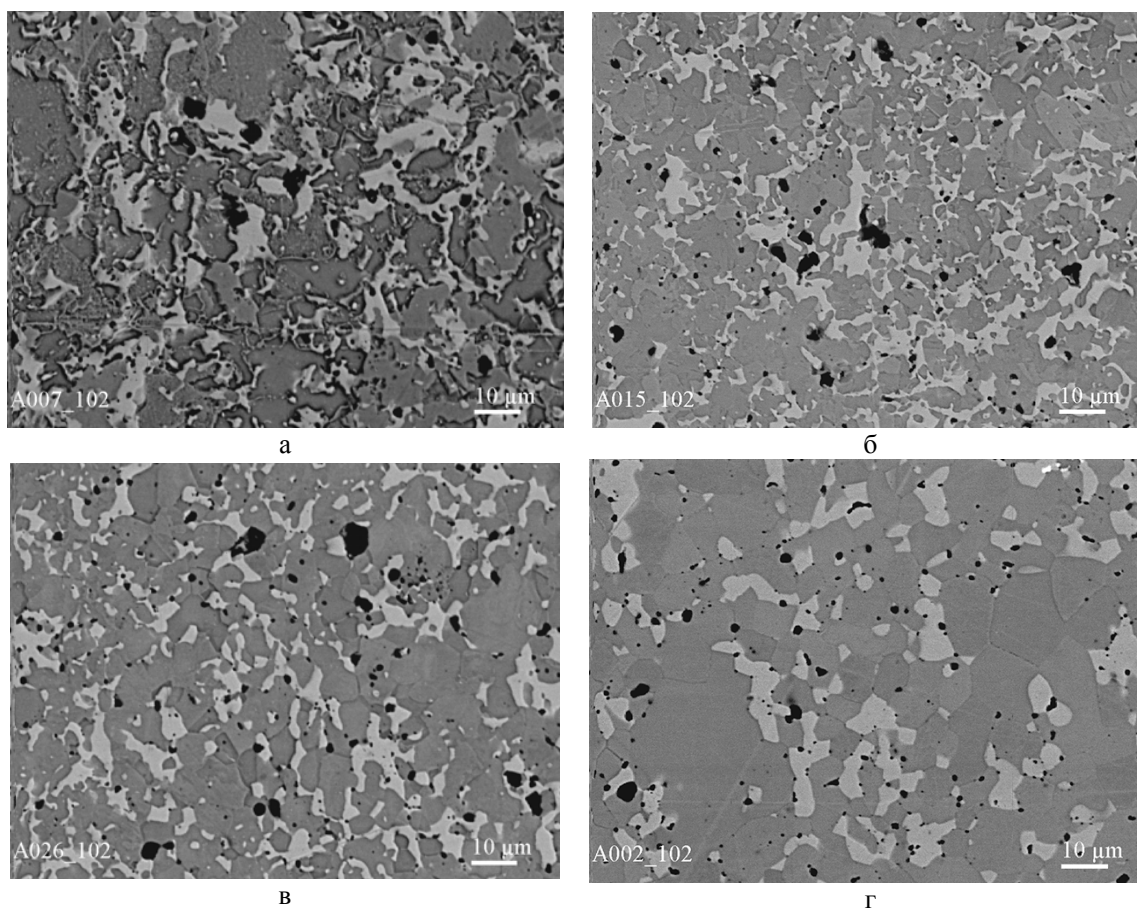


Рис. 1.

Таким образом, неоднородность сред исследуемых материалов на мезоуровне обусловлена наличием не только трех исходных фаз (Fe-Cu-Mo) и пористости, но и новыми образованиями. Размеры этих структурных элементов (см. рис. 1) не превышают несколько десятков мкм, значения акустических характеристик известны [2], поэтому такую среду на частотах менее 10 МГц упругая волна будет воспринимать как квазиоднородную, а скорость её распространения – отображать эффективные свойства материала [3].

Для постановки измерительного эксперимента была выбрана модель квазиоднородного трансверсально-изотропного упругого тела [4], позволяющая отображать порошковые материалы, получаемые по разным технологиям изготовления [5]. В рамках этой модели среду описывают характеристиками упругости в двух направлениях. Применительно к порошковым материалам – это направление прессования и перпендикулярное ему. Для оценки свойств упругости в заданном направлении используют жёсткость [6], связанную со скоростью распространения продольных упругих волн c_1 в этом направлении формулой

$$\rho (c_1)^2, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала.

2. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Акустические исследования проводили на спеченных образцах.

Скорость распространения продольной упругой волны измеряли на частоте 5 МГц импульсным методом калиброванного времени задержки [7] с ударным возбуждением колебаний излучающего преобразователя [8] при сквозном прозвучивании образца в направлении прессования F и перпендикулярном ему (рис. 2). Метод реализован на базе комплекса для прецизионных акустических измерений, разработанного в ИПМ НАН Украины [9]. В качестве контактной жидкости применяли воду. Для защиты образца от воздействия контактной жидкости использовали пленку толщиной 0,13 мм. Толщину образцов h измеряли микрометром.

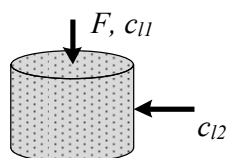


Рис. 2.

Скорости распространения упругой волны в направлении прессования c_{11} и перпендикулярном ему c_{12} рассчитывали по формуле:

$$C = \frac{h}{t_{изм} - t_o}, \quad (2)$$

где $t_{изм}$ и t_o – измеряемое время и время систематической погрешности, соответственно.

Для описанной методики погрешность определения скорости распространения упругой волны в исследуемых образцах составляла не более 1 %.

По результатам измерений проведена оценка степени анизотропии образцов, как отношения скоростей, измеренных в двух направлениях [10]. Кинетика изменения анизотропии материала в процессе спекания показана на рис. 3. Как видно из рисунка, при малых временах спекания наблюдается зависимость степени анизотропии от концентрации молибдена. Степень анизотропии образцов 70Fe-30Cu без молибдена, спеченных в течение 1 часа, не превышает 1,15. В образцах состава 63Fe-27Cu-10Mo степень анизотропии близка к величине 1,05. Однако, с увеличением времени спекания с

2 до 8 час. анизотропия скорости распространения упругой волны практически отсутствует во всех образцах.

Скорости распространения упругой волны в образцах c_{11} и c_{12} , полученных при разном времени спекания для различных концентраций молибдена, приведены на рис. 4. Из рисунка видно, что обе эти скорости для всех концентраций молибдена растут с увеличением времени спекания. При малом времени спекания величины скорости в направлении прессования существенно меньше, чем в противоположном для всех концентраций молибдена, а, начиная с 4 час. спекания, их значения выравниваются, что можно объяснить более сильно выраженными релаксационными процессами при малом времени спекания. Увеличение концентрации молибдена до 5 % для любого времени спекания в обоих направлениях приводит к увеличению скорости, но дальнейшее увеличение (до 10 %) – перестаёт влиять.

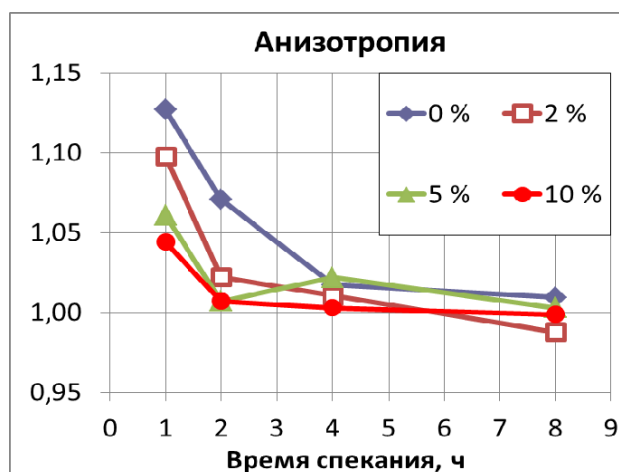


Рис. 3.

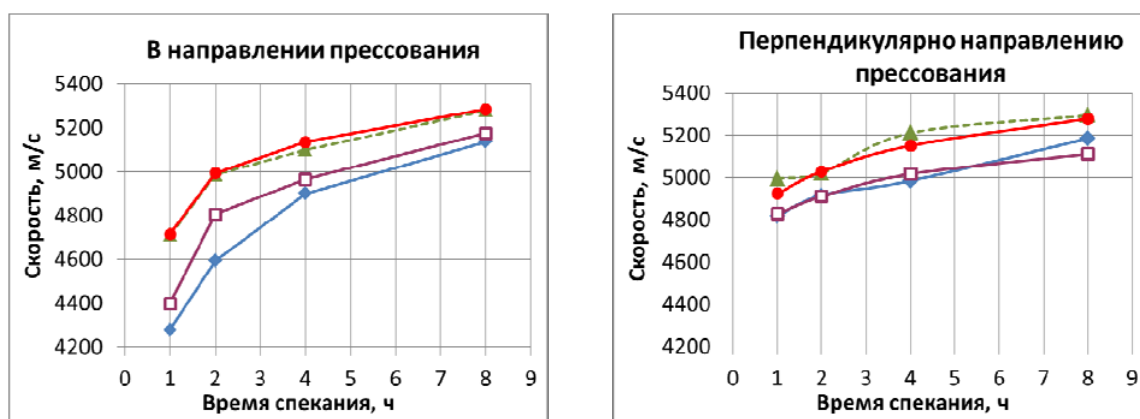


Рис. 4. Концентрация молибдена: \blacklozenge – 0; \square – 2; \blacktriangle – 5 и \bullet – 10 %

5. ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОСТИ

Учитывая незначительную анизотропию или её практическое отсутствие в спеченных образцах, для расчёта модулей упругости по экспериментальным значениям скоростей распространения упругих волн и оценки влияния на них пористости, а также для теоретических расчётов характеристик упругости по свойствам исходных компонентов использована модель квазиоднородного изотропного линейно упругого твёрдого тела, состояние которого описывают эффективными характеристиками упругости [3]:

$$c_1 = \left(\sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \right); \quad c_t = \left(\sqrt{\frac{E}{\rho(1+\mu)}} \right) = \sqrt{\left(\frac{G}{\rho} \right)}, \quad (3)$$

где E , G – модули упругости и сдвига, соответственно; μ – коэффициент Пуассона. При расчётах экспериментальных значений модуля упругости принимали $\mu=0,3$ [2].

Экспериментально полученные значения модуля упругости были приведены к беспористому состоянию в соответствии с формулой [5]:

$$E = E_0(1-\theta)^2, \quad (4)$$

где E_0 – модуль Юнга беспористого материала; θ – пористость. Это позволило сопоставить их с теоретическими значениями по вилке Фойхта и Рейесса [11], которые учитывают только свойства исходных компонентов и их напряжённое состояние. Экспериментальные значения модуля упругости от концентрации молибдена для разного времени спекания и результаты теоретических расчетов приведены на рис. 5.

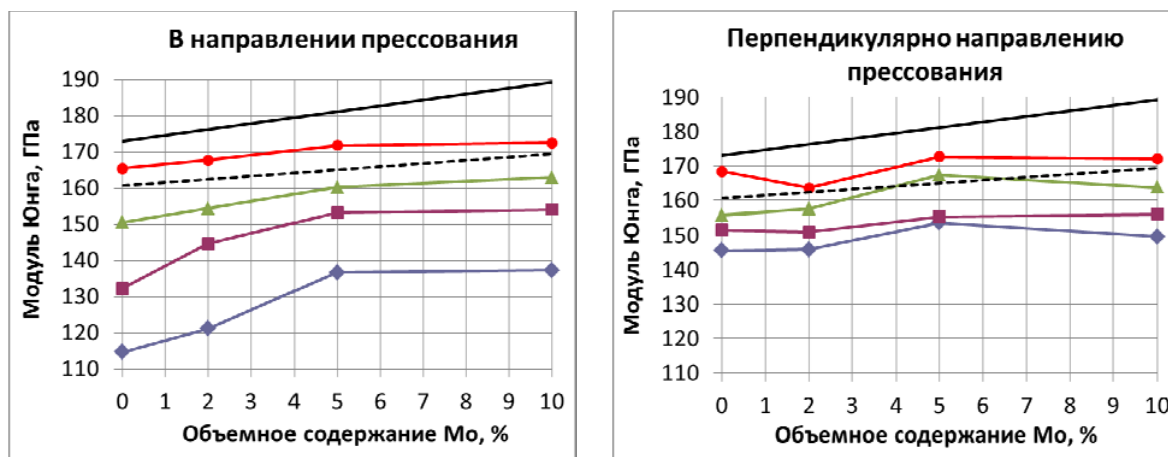


Рис. 5. Время спекания: \blacklozenge – 1; \blacksquare – 2; \blacktriangle – 4 и \bullet – 8 час.;
теоретические зависимости: — – по Фойхту; - - - по Рейессу

Из рис. 5 видно, что значения модуля упругости растут с увеличением времени спекания для всех образцов и достигают значения (170 ± 3) ГПа при времени спекания 8 час. Объёмное содержание молибдена приводит к увеличению модуля упругости только при малых (до 5 %) значениях со скоростью тем ближе к теоретической, чем больше время спекания, а затем перестаёт расти, что согласуется с результатами рентгенофазового анализа. Отличие теоретических зависимостей от экспериментальных, особенно при малом процентном содержании молибдена, может быть связано с тем, что

расчет проводили для чистых металлов, а образцы состоят из твердых растворов металлов.

ВЫВОДЫ

Подтверждено, что комплексный экспериментально-теоретический подход и корректная постановка эксперимента позволяют повысить информативность и надёжность акустических измерений.

В результате акустические исследования позволили определить характеристики упругости псевдосплавов на основе системы Fe-Cu-Mo. Спеченные образцы, полученные твердофазным спеканием, характеризуются изотропной величиной модуля Юнга, равной (170 ± 3) ГПа.

Установлено влияние состава, структуры и технологии изготовления псевдосплавов на основе системы Fe-Cu-Mo на их характеристики упругости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скорород В.В. Механизм повышения физико-механических свойств спеченных железомедных композитов при легировании молибденом/ В.В.Скорород, О.И.Гетьман, В.В.Паничкина, и др. // Порошковая металлургия – 2017 – №7/8. – С. 10–20.
2. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
3. Безымянный Ю.Г. Акустическое отображение материалов с развитой мезоструктурой // Акустичний вісник. – 2006. – Том 9. – №2. – С. 3–16.
4. Методы акустического контроля металлов/ А.П.Алешин, В.Е.Белый, А.Х.Вопилкин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.
5. Роман О.В., Скорород В.В., Фридман Г.Р. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. – Минск: Вышэйш. шк., 1989. – 182с.
6. Тимошенко С.П. Курс теории упругости. – К.: Наук. Думка. 1972. – 508 с.
7. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твёрдого тела, М.: Мир, 1972. – 308с.
8. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 томах / Под общ.ред. В.В. Клюева. Том 3: И.Н.Ермолов, Ю.В.Ланге. Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
9. Безымянный Ю.Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов. Порошковая металлургия – 2001. – №5/6 – С. 23–33.
10. Безымянный Ю.Г. Исследование анизотропии свойств порошкового железа / Ю.Г.Безымянный, В.В.Скорород, О.В.Талько, Г.Р.Фридман // Порошковая металлургия. – 2006. – №3/4. – С.88–97.
11. Скорород 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.