

УДК 534.231.2:620.111.3:539.32

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПОРОШКОВОГО ЖЕЛЕЗА**БЕЗЫМЯННЫЙ Ю.Г.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,**КУЩЕВСКИЙ А.Е.**, канд. химич. наук, ст. науч. сотр., **МЕШКОВА Г.А.***Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАНУ, г. Киев, Украина.*

На основании анализа особенностей технологии формования порошкового железа и его акустического отображения посредством функциональных и стохастических зависимостей скорости распространения и коэффициента затухания продольной упругой волны от пористости подтверждено явление нерегулярности процесса уплотнения гетерогенного порошкового железа и показана возможность использования скорости распространения упругих волн для экспресс-контроля состояния материала при его формовании.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа представляет собой пример практического применения методологии акустического контроля физико-механических свойств, элементов структуры и дефектности многофазных гетерогенных материалов [1] к гетерогенному порошковому железу.

Материалы порошковой металлургии, изготавливаемые холодным прессованием с последующим спеканием из порошка железа или смесей на его основе, широко применяются как конструкционные и антифрикционные [2]. В связи со сложностью технологических процессов их получения и меньшей стабильностью свойств, по сравнению с традиционными материалами, для гарантии качества материалов на основе порошкового железа необходим сплошной экспрессный контроль изготавливаемой из них продукции на соответствие требуемым нормам, особенно в ответственных узлах машин и механизмов [3]. В настоящее время, из-за отсутствия надежных неразрушающих методов контроля порошковых материалов, такой контроль практически не проводится ни при разработке новых материалов, ни при их изготовлении, ни при использовании у потребителей. Поэтому разработка методов неразрушающего контроля качества материалов на основе порошкового железа является насущной необходимостью.

В работе анализировалась возможность использования ультразвуковых неразрушающих методов, основанных на измерении акустических характеристик материала - скорости распространения и коэффициента затухания упругой волны – для контроля процесса формования полидисперсного порошкового железа.

1 АНАЛИЗ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

В последнее время появилось много экспериментальных и теоретических работ, в которых отмечалось, что процесс формования гетерогенного порошкового железа проходит немонотонно. [4] Немонотонный характер зависимости многих физико-механических свойств от пористости связывался с периодическим переходом структуры материала при изменении усилия прессования от субмезоструктурного состояния к мезоструктурному.

Физико-механические свойства сформованного материала определяются свойствами исходных частиц порошка, их взаимным расположением, количеством и качеством связей, морфологией порового пространства, т.е. процентным содержанием, видом, формой, распределением по объему материала пор [3]. Или, другими словами, свойства

порошкового матеріала определяються його мезо- или субмезоструктурой. Интегральной мерой уплотнения готового материала является пористость [2].

При увеличении усилия прессования происходит уплотнение материала. При этом происходит уменьшение пористости и изменяется структура материала: частицы порошка то объединяются в упорядоченные системы – упаковки (мезоструктурное состояние), то происходит разрушение этих систем и частицы находятся в разрозненном состоянии (субмезоструктурное состояние). Такой процесс уплотнения является немонотонным [4]. При этом, с периодом в 2%, на интервале пористости от нескольких десятков до единиц процентов, происходит изменение структуры от одного вида упаковки частиц к другому. Такое изменение свойств данного материала связано с взаимным расположением частиц, качеством и количеством их связей, морфологией порового пространства.

Распространяющаяся в порошковом железе упругая волна взаимодействует с элементами его структуры, несёт информацию об особенностях этой структуры и соответствующих ей свойствах материала. Изменение скорости распространения упругой волны происходит в результате изменения характеристик упругости (упаковка частиц, качество связей между частицами) и инерции (пористость) материала, а коэффициент затухания зависит от рассеяния на порах и поглощения в неидеальных контактах между частицами. Поэтому изначально предполагалось, что обе эти характеристики будут отражать немонотонный характер изменения структуры при изменении усилий прессования в процессе формирования полидисперсного порошкового железа.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОГО ПОРОШКОВОГО ЖЕЛЕЗА

В качестве структурной модели материала выбрана бифазная гетерогенная модель с матричной структурой [1].

Зависимость скорости распространения продольной упругой волны от пористости для такой модели имеет вид [5]:

$$V_{\text{п}} \approx V_{i0} \sqrt{\frac{(1 - 2\theta)[1 + \theta/(1/v_0 - 1)]}{(1 - \theta)[1 - \theta/(1/v_0 + 1)][1 + \theta/(1/2v_0 - 1)]}} \quad (1)$$

где V_{i0} – скорость распространения продольной и упругой волны в беспористом материале, v_0 – коэффициент Пуассона беспористого материала, θ – пористость.

Для продольной ультразвуковой волны длиной λ_l были получены такие соотношения связывающие коэффициент затухания α , обусловленный рассеиванием на порах, с такими параметрами как частота f , радиус поры R и скорость распространения продольной V_l и поперечной V_t упругой волны [5]:

$$\alpha = \frac{8\Theta\pi^4}{3} \frac{f}{V_l} \left(\frac{R}{\lambda_l}\right)^3 g_l = \frac{8\Theta(\pi f)^4 R^3}{3V_l^4} g_l \quad (3)$$

где

$$g_l = \frac{4}{3} + 40 \frac{2 + 3\left(\frac{V_l}{V_t}\right)^5}{\left[4 - 9\left(\frac{V_l}{V_t}\right)^2\right]^2} - \frac{3}{2}\left(\frac{V_l}{V_t}\right)^2 + \frac{2}{3}\left(\frac{V_l}{V_t}\right)^3 + \frac{9}{16}\left(\frac{V_l}{V_t}\right)^4$$

Как видно из выражения (3), коэффициент затухания упругой волны имеет кубическую зависимость от волновых размеров пор и линейную – от пористости.

Для материала с различными размерами пор была принята гипотеза линейного суммирования коэффициентов затухания:

$$\alpha_{\Sigma} = \sum \alpha_n \quad (4)$$

где α_n – коэффициенты затухания упругой волны, обусловленные наличием пор радиуса R_n .

3 АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Были проведены экспериментальные измерения скорости распространения и коэффициента затухания продольной упругой волны в полидисперсном прессованном порошковом железе при значениях пористости от 18 до 30 %. Измерения проводилось методом радиоимпульса с дискретной задержкой [6] на частоте 1 МГц со сквозным прозвучиванием исследуемых цилиндрических образцов материалов по высоте. Скорость распространения упругой волны определялась по времени распространения упругого импульса в исследуемом образце, при этом учитывалась систематическая погрешность. Методика измерений описана в [7]. Результаты измерений скорости распространения приведены на рис. 1 в виде точек (o).

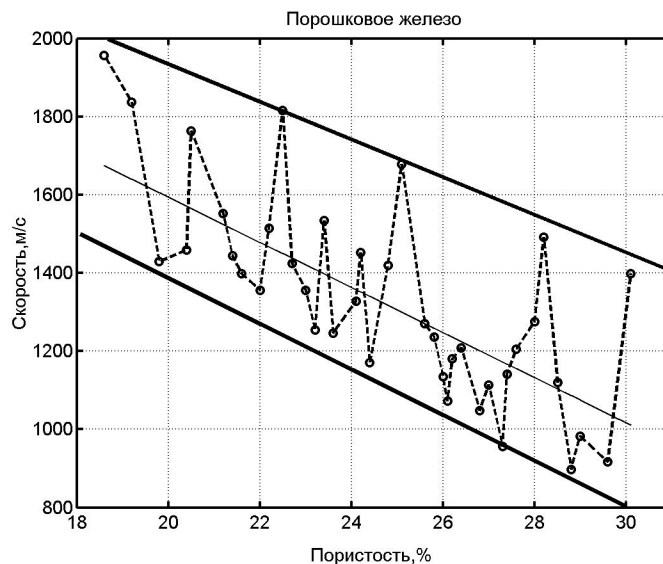


Рис.1.

Проанализировав полученную экспериментальную кривую (пунктирная линия), можно сделать вывод об общей тенденции уменьшения скорости с возрастанием пористости. Эта тенденция хорошо описывается функциональной зависимостью (1) (средняя сплошная линия на рис. 1). При этом относительно этой зависимости происходит осцилляция экспериментальных значений скорости от максимальных значений до минимальных и обратно (эти значения можно описать функциями, имеющими такую же тенденцию к спаданию, что и средняя линия) с периодом пористости примерно 2%.

По методике, описанной в [8] был проведен регрессионный анализ полученных экспериментальных значений. Линия регрессии приведена на рис. 2 в виде сплошной прямой. Линейная эмпирическая регрессионная зависимость хорошо отображает общую тенденцию скорости к уменьшению с увеличением пористости. Но, все же, она не

отражает присущей для экспериментальных значений скорости значительной дисперсии. Эта дисперсия вызвана периодическим отклонением значений скорости то в вверх, то вниз с интервалом пористости примерно 2 % и хорошо объясняется описанной моделью процесса немонотонного формирования структуры порошкового материала при его уплотнении.

На рис.2 показаны границы 95 %-ной доверительной области (пунктирные линии). Как видно из рисунка большинство измерений не попадают в доверительный интервал.

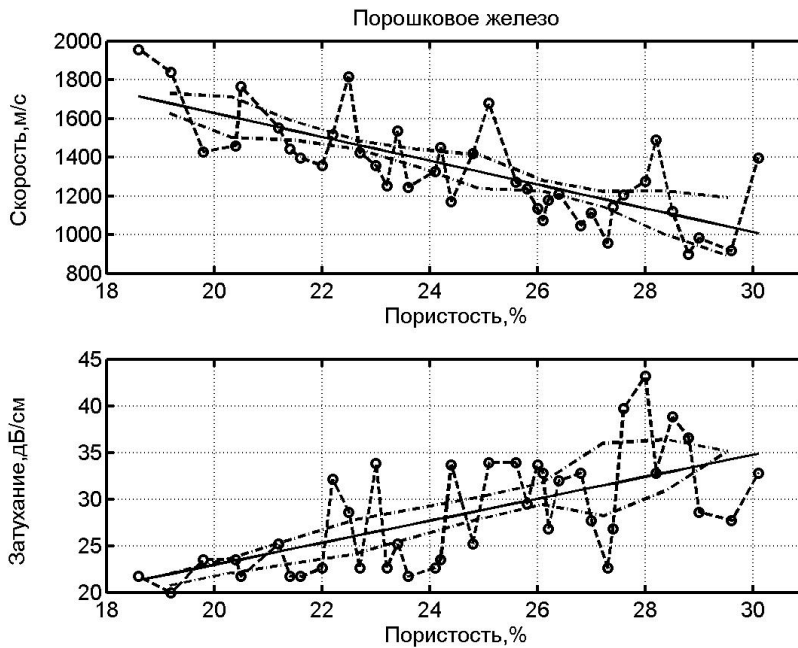


Рис.2.

В работе были проведены расчеты верхних и нижних оценок эффективной скорости распространения упругой волны по Фойгту и Рейссу а также по Хашину-Штрикману [9]. Сопоставление полученных оценок показывает, что верхняя и нижняя оценки по Хашину-Штрикману гораздо более определены, но, и они не описывают достаточно точно свойства рассматриваемого материала.

Результаты измерения коэффициента затухания упругой волны представлены на рис.2. в виде точек (o). Проведен регрессионный анализ полученных экспериментальных значений. Линия регрессии приведена на рис. 2 в виде сплошной прямой. Построена 95 %-ная доверительная область (рис2, штриховые линии). Как и для скорости распространения линия регрессии хорошо описывает общую тенденцию затухания к возрастанию с увеличением пористости, а экспериментальные значения имеют большое рассеивание относительно линии регрессии. В отличие от скорости, для затухания не столь ярко выражена периодичность осцилляций. Это можно объяснить тем, что на коэффициент затухания упругой волны влияет гораздо больше факторов, чем на скорость.

На рис.3 представлена функциональная зависимость коэффициента затухания (штрих-пунктир) от пористости. Как видно из рис., коэффициент затухания имеет тенденцию к возрастанию с увеличением пористости. Расхождения в экспериментальных

и функциональных зависимостях связаны с наличием других, помимо рассеяния на порах, механизмов потерь энергии ультразвуковых волн, например, несовершенством контактов.

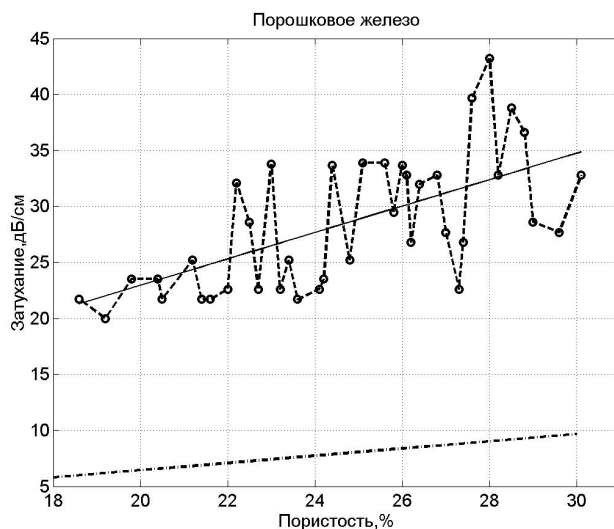


Рис.3

4 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНОГО ПОРОШКОВОГО ЖЕЛЕЗА

Полученные экспериментальные результаты для зависимости скорости распространения упругой волны от пористости позволяют предложить следующую математическую модель этой зависимости. Предполагаем, что точки, соответствующие максимальным значениям скорости распространения упругой волны (мезоструктурное состояние) V_{Bi} с увеличением пористости убывают по некоторому закону F_B , а точки, соответствующие минимальным значениям (субмезоструктурное состояние) V_{Ai} с увеличением пористости убывают по функциональному закону F_A . Пускай эти функции имеют начальное значение V_0 , которое соответствует скорости распространения продольной упругой волны в материале порошка. Положим, что при переходе от мезоструктурного состояния к субмезоструктурному скорость линейно убывает, а от субмезоструктурного к мезоструктурному - линейно возрастает. Тогда функциональная зависимость скорости распространения в прессованных материалах от пористости имеет вид:

$$V(\Theta) = F_B \cdot \left[1 - 2 \cdot \left| \frac{\Theta}{T} - \text{ent}\left(\frac{\Theta}{T}\right) - \frac{1}{2} \right| \right] + F_A \cdot 2 \cdot \left| \frac{\Theta}{T} - \text{ent}\left(\frac{\Theta}{T}\right) - \frac{1}{2} \right| \quad (5)$$

Функции F_A и F_B найдем по методу, предложенному в работе [10], как усредняющие скорости упругих волн в железе (V_0) и воздухе (V_A) по одному из законов:

$$F_B = (1 - l \cdot \Theta) \cdot V_0^m + k \cdot \Theta \cdot V_A^n, \quad (6)$$

$$F_A = V_0^{(1-\Theta)} \cdot V_A^{n \cdot \Theta} \quad (7)$$

ВЫВОДЫ

В результате анализа особенностей процесса уплотнения порошкового железа и его отображения с помощью акустических характеристик материала, на основании

структурного и математического моделирования этого процесса, установленных функциональных зависимостей скорости распространения и коэффициента затухания продольной упругой волны от пористости, можно сделать вывод, о перспективности использования рассматриваемых неразрушающих методов для проведения экспрессного контроля технологии уплотнения материала.

В рамках предложенной модели, совместный анализ скорости распространения и коэффициента затухания ультразвуковых волн, измеренных в процессе изготовления пористых материалов, является перспективным для определения степени консолидации порошковых тел и эквивалентного размера пор.

Расхождения между теоретическими и экспериментальными результатами связаны с упрощенностью использованной модели материала. Для эффективного применения акустических характеристик при контроле параметров структуры и физико-механических свойств порошкового железа и управления процессами уплотнения материала необходимо дальнейшее развитие модели в направлении учета влияния на измеренные характеристики таких структурных факторов как форма пор, границ раздела между частицами и т.д.

Результаты работы могут быть положены в основу неразрушающих акустических методов экспрессного контроля степени уплотнения материалов на основе порошкового железа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безмяный Ю.Г. Методология акустического контроля многофазных гетерогенных материалов / Збірник праць акустичного симпозіуму «Консонанс 2005». – К.: 2005 – с. 50-55.
2. Пористые проницаемые материалы: Справочник/ Под ред. С.В. Белова – М.: Металлургия, 1987. – 332,[1] с.
3. Роман О. В., Скороход В. В., Фридман Г. Р. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. – Минск: Выш. шк., 1989. – 182 с.
4. Кушевский А.Е., Безмяный Ю.Г. Метод прецизионного определения упругого последствия прессовок из порошков после снятия давления прессования // *Nove kierunki technologii i badan materialowych / Redakcja Naukowa j. Ranachowski, j. Raabe, W.Petrowski.*- Warszawa.-1999.-с.397-400.
5. Безмяный Ю.Г. Использование акустических характеристик для контроля структуры пористых материалов // *Электронная микроскопия и прочность материалов: Сб. науч. тр. – Киев: НАН Украины. ИПМ, 1999. – С. 93-105.*
6. Р.Труэлл, Ч.Эльбаум, Б.Чик. Ультразвуковые методы в физике твёрдого тела, М.: Мир, 1972.- 308 с.
7. Безмяный Ю.Г., Вдовиченко А.В., Кузьменко В.А. Некоторые результаты акустических исследований материалов, изготовляемых методами порошковой металлургии.- Киев: ИПМ НАН Украины, 1994.- 63с.
8. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
9. Безмяный Ю.Г., Боровик В.Г., Степаненко А.В. Дослідження взаємозв'язку модуля пружності композиту алмаз + SiC з його структурним станом. // *Доповіді НАНУ. – 2003. - №2. –С. 90-93.*
10. Скороход В.В. Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах // *Порошк. металлургия. - 1995, № 1-2, С. 53-71.*