

УДК 539.2: 620.7

**МЕТОДОЛОГИЯ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МНОГОФАЗНЫХ
ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ****Ю.Г.БЕЗЫМЯННЫЙ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.***Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАНУ, г. Киев, Украина*

Рассмотрена методология использования акустических неразрушающих методов для решения задач контроля физико-механических свойств, структуры и дефектности многофазных гетерогенных материалов. Выделены узловые моменты при разработке и для эффективного использования акустических методов при решении указанных задач. Рассмотрены особенности двух групп из выделенных узловых моментов применительно к контролю многофазных гетерогенных материалов: анализ особенностей материала и выявление численной связи акустических характеристик материала с его искомым свойством.

ВВЕДЕНИЕ

Многофазные гетерогенные материалы, получаемые методами порошковой металлургии, широко используются в различных отраслях промышленности как конструкционные, антифрикционные, инструментальные, фильтрующие, демпфирующие. Их получают из различных порошков и волокон методами технологии дисперсных систем путём создания развитой мезоструктуры. К этой группе материалов можно отнести порошковые, волокнистые, керамические, сетчатые, высокопористо-ячеистые, композиты различного характера. [1]

Особенностью этих материалов, по сравнению с получаемыми методами традиционной металлургии, является более сложная структура, что приводит при их производстве к большему разбросу свойств материала и к большей вероятности появления дефектов. Поэтому неразрушающий контроль свойств и дефектности таких материалов играет важную роль и при отработке технологии их создания и при их производстве. [2]

Известные методы неразрушающего контроля далеко не всегда позволяют решать эти задачи, а каждая задача имеет свои особенности и предполагает оптимизацию своего решения для конкретного материала. [3] В связи с этим при появлении новых материалов возникает вопрос о доработке известных методов неразрушающего контроля или разработке новых с учётом индивидуальных особенностей объекта контроля. Большое разнообразие материалов и методов контроля требует осмысленного пути решения таких задач. В настоящей работе рассмотрены методологические подходы, позволяющие находить оптимальные пути решения указанных задач, используя акустические методы неразрушающего контроля.

**1 МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
МНОГОФАЗНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Акустические методы контроля, как и большинство неразрушающих методов, относятся к косвенным. Поэтому для их обоснования, разработки и проверки необходимо решить цепочку взаимосвязанных задач [4] (рис. 1). Для гетерогенных многофазных материалов получение достоверных результатов контроля требует особо тщательной проработки и учёта всех звеньев этой цепочки. Рассмотрим их особенности применительно к многофазным гетерогенным материалам.

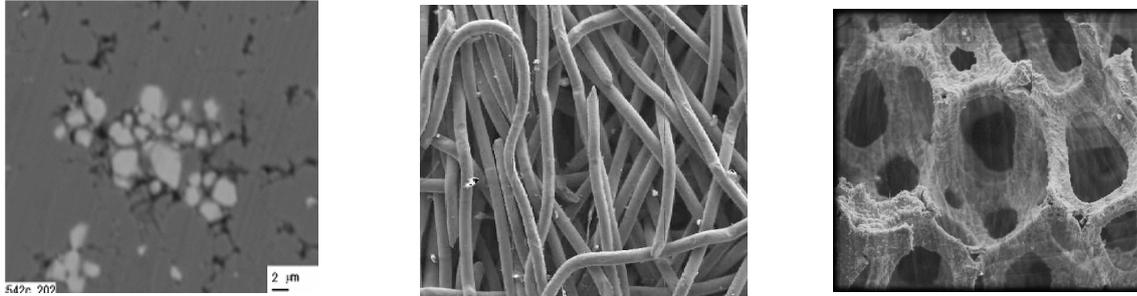


Рис.1

2 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ МАТЕРИАЛА

Примеры структуры многофазных гетерогенных материалов показаны на рис. 2, где а – порошковая прессовка с мягкой медной матрицей и твердыми включениями вольфрама, б – прессовка на основе медных волокон, в - пеноникель. Помимо указанных элементов, для всех этих материалов характерно наличие пор с объемным содержанием от единиц до десятков процентов, а так же наличие примесей, сопровождающих технологический процесс получения материала. Размеры элементов мезоструктуры могут достигать единиц и более миллиметров, в то время как микроструктура может формироваться на уровне нанометров. Далекo не всегда распределение фаз равномерно по объему материала. В силу особенностей технологического процесса или функционального назначения материал может быть структурирован. [1]

Эксплуатационные свойства таких материалов можно рассматривать как интегральные свойства некоего объема, достаточного по величине, чтобы в нем материал мог считаться статистически однородным. Для этого этот объем должен охватывать, в идеальном случае, не менее тысячи представительных элементов структуры (реально можно ограничиться существенно меньшим количеством). [5]



Можно выделить три основных вида задач, которые решаются для таких материалов посредством акустических неразрушающих методов. Это определение физико-механических свойств материала в целом или его отдельных частей, определение размеров структурных элементов материала, выявление дефектов структуры [6]. В первом случае необходимо получать интегральную информацию от представительного объема материала, а, в остальных, анализировать локальные объемы материала, что определяет принципиально разные подходы при решении каждой из указанных задач.

Сложная и разнообразная структура многофазных гетерогенных материалов предопределяет многообразие возможностей формирования в них акустических полей при сложной структуре самого поля. С акустической точки зрения гетерофазные и гетерогенные материалы – это акустически неоднородные структуры. Характер акустического поля в материале определяется акустическими свойствами элементов структуры и их волновыми размерами. Поэтому для одного и того же материала при изменении волнового размера его элементов можно решать различные задачи.

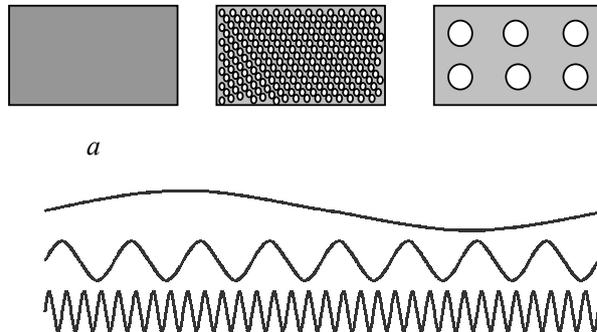
Так, при $a \ll \lambda$ (a – характерный размер элемента структуры, λ – длина упругой волны) разница фаз акустического воздействия на противоположных частях каждого элемента в любой момент времени практически равна нулю, поэтому он не воспринимает колебаний. В этом случае материал можно рассматривать как сплошной и интегрально оценивать его свойства. (Рис. 3, колебание 1 относительно всех трех материалов $a - \nu$).

При $a < \lambda$ – на противоположных частях каждого элемента будет возникать разность фаз механической нагрузки и элемент будет совершать незначительные колебания в акустическом поле, поэтому структурные элементы начинают влиять на закономерности формирования акустических полей и появляется возможность по параметрам акустического поля интегрально оценивать параметры структуры материала. (колебание 2 относительно материала b).

По мере приближения длины волны к размеру элемента амплитуда этих колебаний нарастает (колебание 2 относительно материала ν и колебание 3 относительно материала b) вплоть до резонанса при $a \sim \lambda$ (колебание 3 относительно материала ν). В этом случае на противоположных частях элемента разность фаз достигает максимума. Поэтому элементы структуры активно взаимодействуют с упругой волной, формируя вторичные акустические поля. Их можно использовать для исследования элементов структуры.

При $a > \lambda$ появляется возможность исследовать свойства и характеристики части элемента структуры.

Если $a \gg \lambda$ – вторая фаза воспринимается волной как граница полупространства, вторичные акустические поля формируются по законам отражения и могут быть использованы для анализа интегральных свойств элементов структуры материала.



Акустические методы настолько разнообразны [6] и имеют такой широкий диапазон частот (от практически 0 Гц до десятков ТГц) [7], что выбор соответствующего метода и его параметров обеспечивает при измерениях возможность сформировать такие длины упругой волны, что любой существующий материал с акустической точки зрения можно рассматривать либо как сплошной, либо как дискретный от мезо- до наноуровня – и таким образом решить требуемую задачу контроля.

3 ВЫЯВЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ СВЯЗИ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА И ЕГО ИСКОМОГО СВОЙСТВА

При решении этой задачи контроля с помощью акустических методов одна из наиболее важных проблем заключается в правильной акустической интерпретации задачи [4]. Возможны, как минимум, два пути ее решения: путем моделирования структуры и свойств [3] и статистической обработки экспериментальных данных [8].

В первом случае необходимо построить максимально упрощенную структурную модель материала, абстрагируясь от несущественных для искомого свойства деталей и не потеряв существенные. Затем, перейти от структурной модели к механической (акустической) и на ее основании построить математическую модель. Конечным продуктом такого отображения является функциональная зависимость характеристик акустического поля, существующего или сформированного в исследуемом материале, от характеристик искомого свойства материала, которое мы хотим контролировать, и выбор таких параметров акустического поля, которые наиболее эффективно связаны с параметрами исследуемого свойства материала и позволяют его диагностировать.

Если материал имеет настолько сложную структуру, что установление функциональных зависимостей затруднительно, то можно воспользоваться эмпирическими зависимостями, полученными в результате статистической обработки экспериментальных данных.

Проведенный нами анализ [9] возможности использования простейшей бифазной структурной модели мезоуровня для выявления функциональных зависимостей между акустическими характеристиками и пористостью для ряда отличающихся по своим свойствам порошковых материалов, показал, что, даже для этой сравнительно простой задачи, в большинстве случаев не наблюдается удовлетворительного численного соответствия между функциональными зависимостями и экспериментальными данными. Поэтому в дальнейших исследованиях для материалов со сложной мезоструктурой мы перешли к многофазным гетерогенным и моделям.

Например, можно выделить два типа многофазных гетерогенных структур с развитым мезоуровнем: матричную и каркасную [3]. Рассмотрим их обобщённые структурные модели (Рис. 4а и 4б, соответственно) в предположении, что материал в обоих случаях изотропен и имеет регулярную структуру.

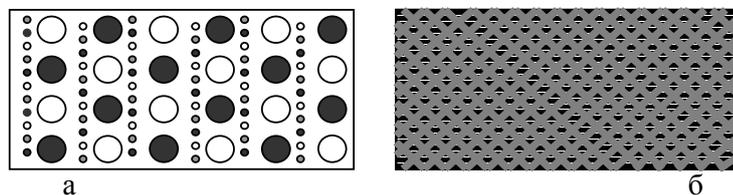


Рис.4.

Первая модель (рис. 4а) представляет собой однородную твердотельную моно- или гетерофазную матрицу, в которой в виде однородных сферических включений разных размеров равномерно расположены другие фазы. Структура материала, в соответствии с этой моделью, описывается такими параметрами, как радиусы фаз и их объёмное содержание. Любое интегральное свойство материала, в соответствии с такой моделью, можно рассматривать как некое эффективное значение этого свойства, являющееся функцией свойств элементов субмезоструктуры и связей между этими элементами. Модель применима при сравнительно небольшом (до 30 %) содержании включений.

Механическое поведение изотропного твёрдого тела полностью определяется четырьмя его акустическими характеристиками, например, двумя различными эффективными скоростями распространения и двумя соответствующими эффективными коэффициентами затухания упругих волн [4]. Тогда для рассматриваемой модели эффективное значение скорости распространения для любой упругой волны можно записать как функциональную зависимость [10]:

$$V_e = F(V_i, V_j, K_k, K_d), \quad (1)$$

где V_i, V_j – скорости распространения упругой волны в материалах, формирующих матрицу, и в материалах включений, соответственно; K_k, K_d – коэффициенты, учитывающие качество контактов между отдельными элементами мезоструктуры и дефектность отдельных элементов мезоструктуры, соответственно.

Для эффективного коэффициента затухания упругой волны такая функция будет иметь вид [10]:

$$\alpha_e = \sum \alpha_i + \sum \alpha_r + \sum \alpha_k + \sum \alpha_d, \quad (2)$$

где $\alpha_i, \alpha_r, \alpha_k, \alpha_d$ – коэффициенты затухания упругой волны, обусловленные поглощением в матрице, рассеянием на включениях, качеством контактов между частицами, наличием дефектов в элементах мезоструктуры, соответственно.

Таким образом, акустические характеристики материала позволяют установить функциональную связь эффективных значений скорости распространения и коэффициента затухания упругой волны, с одной стороны, со свойствами компонентов элементов матрицы, включений, качеством контактов между элементами мезоструктуры и наличием в них дефектов.

Структурная модель каркасной структуры (рис. 4б) представляет собой однородный твердотельный моно- или гетерофазный каркас правильной формы, расположенный внутри моно- или гетерофазного – наполнителя. Структура материала в соответствии с этой моделью описывается геометрическими размерами элементарной ячейки каркаса и объёмным содержанием фаз. Отличительной особенностью этой модели является возможность её применения при большом (до 100 %) содержании наполнителя.

Для каркасной структуры материала, кроме рассмотренных акустических характеристик упругой волны, диагностическими параметрами могут служить резонансные частоты элементов ячейки каркаса [11]. Для них можно записать такую функциональную зависимость:

$$f=F(a_k, V_k, z, K_d), \quad (3)$$

где a_k – размеры соответствующих резонансных элементов каркаса; V_k – скорости распространения упругой волны в каркасе; z – акустическое сопротивление нагрузки (наполнителя) на резонансный элемент.

Для каждой задачи функциональные зависимости (1)-(3) имеют конкретный вид.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопросы постановки акустического эксперимента и проведения контрольного акустического эксперимента не менее важны, однако, в виду ограниченного объема доклада, требуют отдельного рассмотрения.

Описанная методология была использована при исследованиях различных материалов: керамик, порошковых, волокнистых, слоистых и сетчатых композитов, направленно-пористых структур, пенометаллов, и др. Некоторые примеры этих задач приведены в докладах настоящей конференции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. / Відп. ред. І.К.Походня. - Київ: Наук. думка, 1998. С. 447-472.
2. Роман О.В., Скороход В.В., Фридман Г.Р. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. – Минск: Вышэйш. шк., 1989. – 182 с.
3. Скороход В.В. Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах // Порошковая металлургия. - 1995. - № 1/2. – С.53–71.
4. Безымянный Ю.Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошковая металлургия.- 2001.- № 5/6.– С.23–33.
5. Безымянный Ю.Г., Куцевский А.Е. Опыт совершенствования стандартов на методы определения свойств металлических порошков и спеченных изделий // Порошковая металлургия.-2003.-№1/2.-с.
6. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. / Под ред. В.В.Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
7. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав.ред. И.П.Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
8. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
9. Безымянный Ю.Г. Использование акустических характеристик для контроля структуры пористых материалов / Электронная микроскопия и прочность материалов. Сб. науч. тр. Киев, 1999. – С.93-105.
10. Безымянный Ю.Г. Акустические исследования материалов с развитой мезоструктурой // Труды третьей междунар. конф. «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий», Кацивели-Понизовка, Крым, Украина, 2004. – С. 255-256.
11. Bezimyanniy Y.G., Burlachenco Y.V. Relation of acoustics characteristics and structure parameters of Foam nichel // Second Int. Conf. “Materials and Coatings for Extreme Performances” Proceedings of Conferense. Katsiveli-town, Ukraine, 2002, P.363-364.