

УДК 534.2:620.179.16

АКУСТИЧЕСКОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ С РАЗВИТОЙ МЕЗОСТРУКТУРОЙ

Ю. Г. БЕЗЫМЯННЫЙ

*Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев**Получено 05.05.2006*

Установлены закономерности формирования акустического поля в материалах с трехуровневой иерархической структурой и разработаны принципы управления информативностью при отображении свойств мезоуровня. Предложена методология обоснования и отработки акустических методов и их параметров, оптимизированных для решения задач прогнозирования и контроля свойств, структуры и дефектности поликомпонентных материалов. Оригинальность методологии основана на взаимно согласованной адаптации контролируемых объектов, применяемых для их исследований методов и заложенных в эти методы моделей. Рассмотрен один из узловых вопросов методологии – выявление функциональных связей между исследуемыми и акустическими характеристиками материала в рамках различных модельных представлений. В качестве примера возможностей эффективного использования предложенной методологии приведены результаты исследования процесса деформирования пеноникеля и пенонихрома.

Встановлені закономірності формування акустичного поля у матеріалах з тривірневою ієрархічною структурою і розроблені принципи керування інформативністю при відображенні властивостей мезорівня. Запропоновано методологію обґрунтування та відпрацювання акустичних методів та їхніх параметрів, оптимізованих для розв'язання задач прогнозування і контролю властивостей, структури та дефектності полікомпонентних матеріалів. Оригінальність методики полягає у взаємно узгодженій адаптації контрольованих об'єктів, методів, які використовуються для їх досліджень, та закладених у ці методи моделей. Розглянуто одне з вузлових питань методології – встановлення функціональних зв'язків між досліджуваними та акустичними характеристиками матеріалу в межах різних модельних уявлень. Як приклад можливостей ефективного використання запропонованої методології наведено результати досліджень процесу деформування пінонікелю та піноніхром.

The regularities of the acoustic field formation in the materials with a tree-level hierarchical structures are specified and the principles are developed for controlling the information density when representing the mesolevel properties. A methodology is proposed for substantiating and developing the acoustic methods and their parameters optimized for solving the problems of forecasting and controlling the properties, structure and defectiveness of the multi-component materials. The originality of the methodology is in the interconsistent adaptation of the controlled objects, methods used to investigate these objects and models laid in these methods. One of the central questions of the methodology is considered: the revealing of the functional relationships between the studied and acoustic characteristics of the material within the framework of different model concepts. As an example of possibilities of the efficient use of the proposed methodology, the results of studying the deformation process of the foam nickel and foam nichrome are presented.

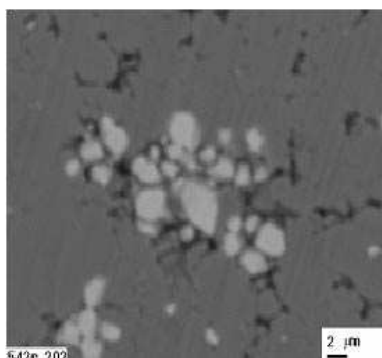
ВВЕДЕНИЕ

Использование методов и технологий создания дисперсных систем позволяет получать материалы с заранее обусловленными эксплуатационными свойствами. При этом в материалах на мезоуровне закладывается определенная, зачастую достаточно сложная, структура [1, 2]. К этой группе можно отнести порошковые, волокнистые, керамические, высокопористо-ячеистые композиты различного характера. [1] Они широко используются в различных отраслях промышленности как конструкционные, антифрикционные, инструментальные, фильтрующие, демпфирующие.

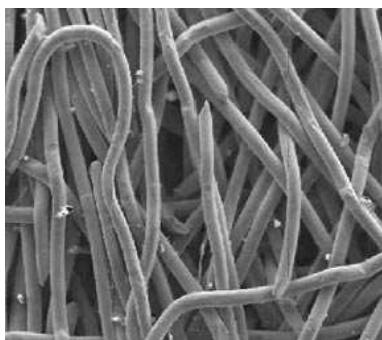
Среди особенностей материалов с развитой мезоструктурой следует отметить многоуровневость их строения и поликомпонентность состава на различных иерархических уровнях. Это приводит при разработке материалов к усложнению процесса прогнозирования закладываемых в них свойств, а при производстве – к большому разбросу их свойств и, соответственно, к большей вероятности

появления дефектов. Применение классических (стандартных) методов предварительной оценки свойств и контроля состояния таких материалов, в большинстве случаев, неэффективно [3–6]. Поэтому актуальной задачей является обоснование, разработка и применение новых методов прогнозирования, исследования и контроля материалов со сложной структурой [3, 4, 7]. Выбор метода связан с особенностями конкретного материала и решаемой относительно него задачи [4]. Большое разнообразие материалов и методов их исследований, сложность решаемых задач не дают возможности осмысленно сформировать стратегию такого выбора и провести оптимизации принимаемого решения. Среди наиболее широко используемых и перспективных следует назвать акустические методы неразрушающего контроля [3, 4, 7].

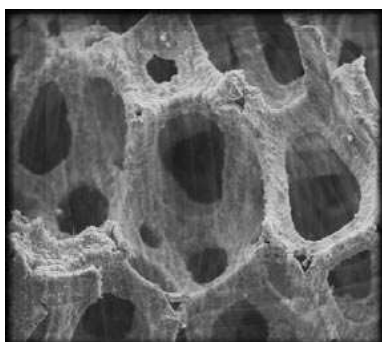
Цель настоящей статьи состоит в установлении особенностей формирования акустических полей в материалах с развитым мезоуровнем и разработке принципов их использования для получения по результатам акустических измерений инфор-



а



б



в

Рис. 1. Структуры материалов с развитым мезоуровнем:
 а – порошковая прессовка с медной матрицей и включениями вольфрама,
 б – прессовка на основе медных волокон,
 в – пеноникель

мации о мезоуровне многофазных материалов. В отличие от чисто теоретических или чисто практических работ, мы пытались совместить известные теоретические наработки с экспериментом: на основании модельных представлений выработать важные для получения достоверных результатов измерения рекомендации и, наоборот, учитывая экспериментальный опыт, заложить правильный путь теоретического обоснования решаемых задач.

В качестве исходной для проведения исследований взята работа [7], в которой аналогичная цель для пористых материалов достигалась путем реализации цепочки последовательных шагов:

- анализа объекта контроля и решаемой задачи;
- установления связи между акустическими и искомыми характеристиками материала;
- выбора или разработки метода исследований;
- аппаратной и методической реализации выбранного метода;
- экспериментальной проверки выбранных решений;
- использования результатов для решения поставленной задачи.

В отличие от указанной работы, в данном исследовании существенно расширяется круг контролируемых материалов и вводится дополнительная задача контроля дефектности, имеющая существенные особенности для рассматриваемых классов материалов.

1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МАТЕРИАЛОВ С РАЗВИТОЙ МЕЗОСТРУКТУРОЙ

В соответствии с [7], исходными данными для достижения цели будут особенности рассматриваемых классов материалов и задач, стоящие перед методами контроля.

Отличительной особенностью материалов с развитой мезоструктурой [8] является многоуровневое строение, средний уровень которого (между микро- и макро-) в общем случае формируется из разнофазных элементов, обладающих значительной дисперсностью [4]. Эта структура определяется объемным и размерным распределением исходных компонентов (фаз), а результирующие свойства материала – исходными свойствами этих компонентов, качеством их соединения, особенностями структуры и наличием дефектов [4]. Примеры структур многофазных гетерогенных на мезоуровне материалов показаны на рис. 1. Основные задачи, связанные с разработкой, производством и эксплуатацией таких материалов состоят в следующем:

- в возможности прогнозировать свойства композита по свойствам исходных компонентов и морфологии материала;

- в исследовании свойств композита в соответствии с его эксплуатационным назначением, свойств и размерных характеристик элементов его структуры;
- в гарантии качества материала.

С акустической точки зрения многофазные гетерогенные материалы с развитой мезоструктурой – это акустически неоднородные среды, неоднородность в которых проявляется на различных иерархических уровнях. Использование акустических методов для прогнозирования и исследования свойств таких материалов основано на адекватном отражении искомым характеристикам материала с помощью параметров акустических полей.

Нами была предпринята попытка в рамках единых модельных представлений спрогнозировать функциональную связь между характеристиками композитов, имеющих между собой существенные различия в строении и свойствах, и характеристиками акустических полей в этих материалах [9]. Сопоставление полученных функциональных зависимостей с экспериментальными данными показало, что такой подход дает удовлетворительные результаты только в случае учета в модели основных механизмов формирования акустических полей, соответствующих решаемой задаче для конкретного материала. Поэтому установлены две нежелательные ситуации:

- 1) получение некорректных результатов при использовании для материалов со сложной структурой простых методов прогнозирования;
- 2) необоснованное усложнение процедуры прогнозирования для материалов со сравнительно простой структурой.

Чтобы устранить эти недостатки, при обосновании и разработке методов эффективных измерений характеристик материалов со структурой любой сложности предлагается методология выбора метода контроля, позволяющего получить оптимальное акустическое отображение искомого характеристики материала (рис. 2). Основной заложенный в нее принцип заключается во взаимно согласованной адаптации особенностей методов, моделей и материалов.

Адаптация контролируемых материалов к методам и моделям состоит в разработке такой классификации материалов по задачам контроля с учетом их особенностей, чтобы каждому классу материала для решения определенной задачи можно было поставить в соответствие определенную

модель и разработанный на ее основе метод. Возможные схемы таких классификаций по рассматриваемым задачам – исследованию структуры, физико-механических свойств и дефектности, показаны на рис. 3–5 соответственно. В основу структурной классификации положены классификации по иерархическому принципу [8, 10] и классификация гетерогенных структур [4] с учетом особенностей формирования акустических полей в соответствующих материалах. При классификации по свойствам использовалась традиционная группировка материалов по свойствам [11], однако лишь по тем, которые влияют на формирование акустических полей. Классификация по дефектам проводилась на основе выделения традиционных для рассматриваемых материалов дефектов [3, 12], формирующих их акустические особенности.

Адаптация акустических методов к особенностям материалов состоит в разбиении их на такие классы, каждый из которых позволил бы оптимально решать конкретную задачу для материалов с определенными свойствами. Посредством акустических неразрушающих методов можно решать все три основных вида задач [5]:

- 1) определение физико-механических свойств материала в целом или его отдельных частей;
- 2) определение размеров структурных элементов материала;
- 3) выявление дефектов структуры.

В первом случае необходимо получать интегральную информацию о материале в целом или его части, а в остальных – анализировать отдельные его элементы, что определяет принципиально разные методические подходы при решении каждой из указанных проблем. Общепринятая классификация [5] не позволяет разбить акустические методы неразрушающего контроля на принципиально важные группы, в каждой из которых возможно получить оптимальным путем достоверную информацию о соответствующих свойствах поликомпонентного материала с учетом решения различных задач: усреднения на представительном объеме [13] свойств, выделения размерных характеристик материала или его элементов на заданном иерархическом уровне, учета волновых размеров структурных составляющих контролируемого объекта [14].

Для выявления особенностей формирования акустического поля в материалах с многоуровневой структурой и построения классификации акустических методов неразрушающего контроля,



Рис. 2. Схема обоснованного выбора метода контроля

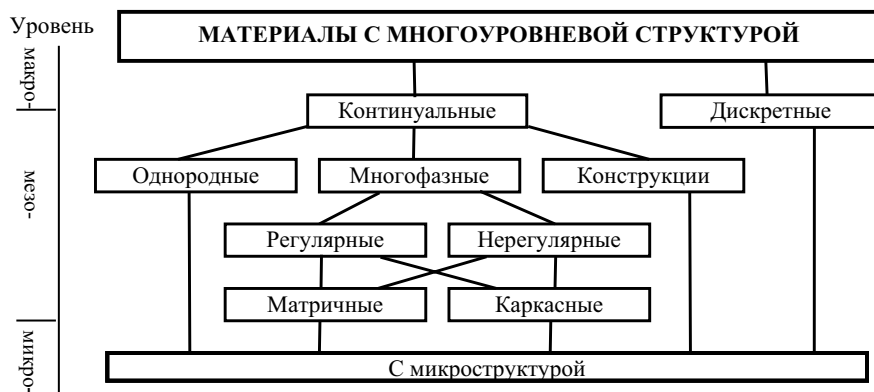


Рис. 3. Классификация материалов по особенностям их структуры



Рис. 4. Классификация материалов по особенностям акустических свойств



Рис. 5. Классификация материалов по дефектам

адаптированной к задачам анализа свойств поликомпонентных материалов, рассмотрим упрощенную структурную модель материала с развитой структурой на мезо- и микроуровнях (рис. 6). Пусть L , A и a – характерные линейные размеры исследуемого объема материала, композиционных объемов мезоуровня и микроуровня соответственно, причем $L \gg A \gg a$. Влияние материала на произвольный параметр акустического поля можно задать как некоторый коэффициент передачи K , связывающий его значение до и после прохождения через материал [15]. Тогда условно, с учетом влияния волновых размеров на степень осреднения результатов измерений [16, 17], зависимость этого коэффициента от волновых размеров элементов структуры материала представим в соответствии с рис. 7. В каждой из указанных здесь зон закономерности формирования акустических полей существенно отличаются от других, а их параметры несут преимущественную информацию о свойстве материала в целом, ансамбле или отдельных элементах мезоуровня (см. таблицу). Поэтому получение по результатам акустических измерений корректной информации о состоянии элемента, принадлежащего к определенному уровню, предполагает создание специальных условий формирования – съема акустического поля, обеспечивающих наиболее сильное проявление искомого свойства в регистрируемом его параметре. Управление информативностью акустического поля достигается путем адаптации метода измерений к особенностям исследуемого материала и решаемой относительно него задачи.

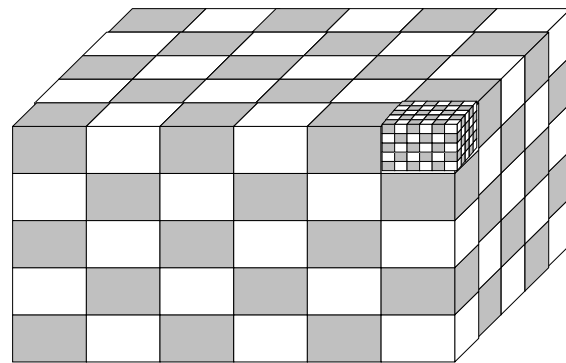


Рис. 6. Структурная модель материала с развитой структурой на мезо- и микроуровнях

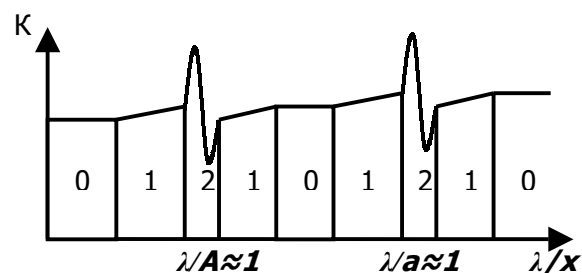


Рис. 7. Коэффициент передачи параметра упругой волны, прошедшей исследуемый объем материала:

0 – зона длинноволнового приближения для элементов соответствующего иерархического уровня,

1 – переходная зона,

2 – зона наиболее сильного проявления аномального влияния элемента соответствующего уровня на параметры упругой волны

Таблица. Характерные волновые области формирования акустических полей в материалах с мезоструктурой

| Волновой размер элементов | Акустическое восприятие материала | | | Формирующие акустическое поле факторы |
|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| | макроуровня | мезоуровня | микроуровня | |
| $a \ll A \ll \lambda$ | континуально-однородный | континуально-однородный | — | свойства макроуровня |
| $a \ll A < \lambda$ | квази-однородный | ансамбль элементов | — | свойства макро- и мезоуровней |
| $a \ll A \sim \lambda$ | дискретный | ансамбль элементов | континуально-однородный | свойства мезоуровня |
| $a \ll \lambda < A$ | кусочно-однородный | взаимосвязанные элементы | континуально-однородный | свойства макро- и мезоуровней |
| $a < \lambda < A$ | кусочно-квазиоднородный | взаимосвязанные элементы | ансамбль элементов | свойства макро-, мезо- и микроуровней |
| $a \ll \lambda \ll A$ | конструкция | отдельные элементы | континуально-однородный | свойства мезоуровня |
| $a \sim \lambda \ll A$ | конструкция | дискретный | ансамбль элементов | свойства микроуровня |

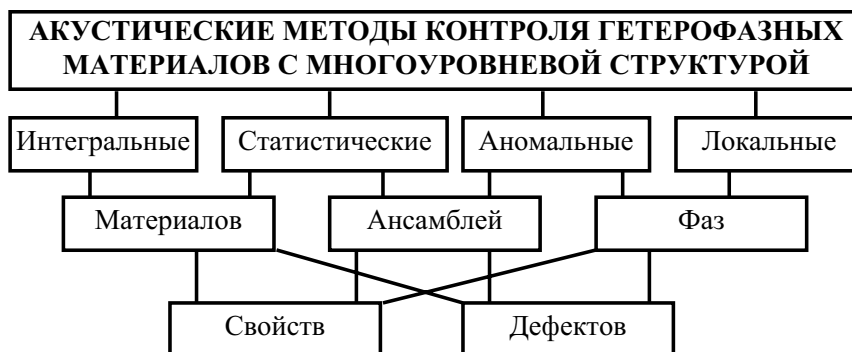


Рис. 8. Классификация акустических методов исследования материалов с развитой многоуровневой структурой

Предлагаемая классификация методов, адаптированная к особенностям измерений в материалах с развитой мезоструктурой, приведена на рис. 8.

Ранее нами был рассмотрен ряд вопросов, решаемых в соответствии с предложенной методологией: постановки задач контроля [7]; возмож-

ности основных методов акустического контроля [18]; принципы постановки акустического эксперимента [14]; пример проведения статистического эксперимента [19]; примеры построения акустических [20, 21], математических [22], компьютерных [15] моделей. В следующем разделе воз-

возможности использования предложенной методологии будут пояснены на примере одного из ключевых ее вопросов – акустического отображения многофазных гетерогенных материалов в рамках различных модельных представлений.

2. ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ. ПАРК МОДЕЛЕЙ

Моделирование материалов производится с целью выявления функциональной связи акустических характеристик материала с его искомым свойством. Разнообразие материалов по структуре, физико-механическим свойствам, видам дефектов определяет большое количество комбинаций их характеристик, в рамках которых может быть построена модель и решена задача. Для того, чтобы в соответствии с моделью по акустическим характеристикам можно было определять то или иное свойство материала, необходимо, чтобы она адекватно отражала решаемую задачу. В настоящее время в акустике известно большое количество стандартных механически и математически формализованных решений, связанных с формированием акустического поля в твердых средах. Часть из них нашла практическую реализацию в методах неразрушающего контроля [23]. Для материалов со сложной структурой использование теоретических решений на практике представляет гораздо более сложную и далеко не всегда однозначную задачу. Во многих случаях она оказывается не решенной, требующей специального рассмотрения и подходов. В нашем случае, при исследовании функциональной связи акустических характеристик материала со сложной структурой с характеристиками его свойств, структуры и дефектности целесообразно использовать известные решения (или их комбинации), отвечающие постановке конкретной задачи. Рассмотрим некоторые из них в связи с задачами контроля поликомпонентных материалов. При этом, в первую очередь, нас будет интересовать возможность практического применения известных моделей.

2.1. Однородная сплошная твердая бездефектная среда

В рамках этой модели получен ряд классических решений о распространении упругих волн бесконечно малой амплитуды в идеализированной безграничной твердой среде, представляющей собой однородный континуум [24].

Реальная твердотельная поликомпонентная среда считается сплошной (континуальной), если ее

можно заменить фиктивной твердотельной средой, каждой точке которой приписан комплекс физических (в том числе и акустических) характеристик, статистически усредненных в репрезентативных объемах локальных участков среды, центры которых расположены в этих точках [25]. При этом репрезентативный объем должен включать в себя достаточное для статистического усреднения количество элементов локального участка среды [16]. В процессе акустических измерений происходит автоматическое усреднение свойств участков на длине упругой волны. Поэтому, в соответствии с указанной рекомендацией, в акустическом поле континуальность материала достигается при малых волновых размерах элементов среды (не более 0.1).

Представительный объем среды, в котором необходимо провести усреднение ее свойств для получения ее истинной интегральной характеристики, должен превышать репрезентативный на несколько порядков [17]. В процессе акустических измерений происходит автоматическое усреднение свойств среды внутри озвучиваемого объема. Поэтому для получения эффективного свойства поликомпонентного материала создаваемое в нем в процессе акустического эксперимента акустическое поле должно охватывать не менее представительный объем материала [13, 14].

Среда считается однородной, если в каждом ее элементарном объеме свойства, в том числе и акустические, одинаковы. С акустической точки зрения, учитывая усреднение на длине волны, материал можно считать однородным, если волновой размер структурных составляющих существенно мал (не более 0.01).

2.1.1. Однородная сплошная изотропная линейно-упругая твердая бездефектная среда

Среда изотропна, если ее свойства не зависят от направления [26]. В ней могут существовать две независимые фазовые скорости распространения упругой волны (V) – продольная V_l и поперечная V_t , связанные со свойствами среды функциональными зависимостями

$$V_l = \sqrt{\frac{E(1-\mu_0)}{\rho_0(1+\mu_0)(1-2\mu_0)}}, \quad (1)$$

$$V_t = \sqrt{\frac{E}{\rho_0(1+\mu_0)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho_0}}.$$

В рамках этой модели акустическими характеристиками материала являются две скорости распро-

странения упругих волн и плотность. Эти характеристики отображают все характеристики упругости и инерции:

$$E = \rho_0 V_l^2 \frac{(1 + \mu_0)(1 - 2\mu_0)}{1 - \mu_0}, \quad G = \rho_0 V_t^2, \quad (2)$$

$$\mu_0 = \frac{1 - (V_l/V_t)^2}{1 - 2(V_l/V_t)^2}.$$

Считается, что другими свойствами среда не обладает. Поэтому при неразрушающем контроле ее свойств для вычисления любой характеристики упругости достаточно измерить две фазовые скорости распространения волн и знать плотность. Другие параметры материала в рамках этого подхода определить нельзя.

Хотя эта модель, ввиду ее простоты, широко применяется на практике, следует отметить, что соотношения (1) и (2) остаются справедливыми при определении реальных характеристик упругости материалов только при выполнении всех ограничений решаемой задачи. Перечислим их: материал изотропен, непрерывен и однороден, а при акустических измерениях созданы такие условия, что возбуждается плоская бегущая упругая волна с амплитудой колебаний, не создающей механических напряжений, превышающих предела упругости, и частотой колебаний, при которой среду можно рассматривать как непрерывную и однородную.

Реальные материалы, тем более с развитой мезоструктурой, далеко не всегда можно рассматривать как непрерывные и изотропные. Они всегда обладают диссипацией упругой энергии и дефектами. Поэтому рассматриваемая модель для большинства поликомпонентных материалов дает только приблизительные оценки характеристик упругости и не позволяет решать большинство практически важных задач.

2.1.2. Однородная сплошная анизотропная линейно-упругая бездефектная среда

Здесь в классическом варианте модели среда остается однородной, сплошной и обладающей в каждой точке одинаковыми свойствами. Но, в отличие от предыдущего случая, свойства, описываемые не скалярными характеристиками, становятся зависимыми от направления [26].

В анизотропной среде в каждом направлении существуют три независимых скорости упругой волны – квазипродольная и две квазипоперечные с различными ориентациями колебаний частиц. Они, как и в изотропном теле, связаны опреде-

ленной функциональной зависимостью с характеристиками упругости и плотностью материала. В зависимости от вида упаковки элементарных ячеек могут формироваться различные виды симметрии [26]. Для каждой из них существует определенное количество констант упругости, которые полностью определяют анизотропию свойств и соответствующее количество независимых скоростей распространения упругих волн.

Материалы, получаемые методами порошковой металлургии, при изготовлении в большинстве случаев проходят стадию прессования, становятся текстурированными и могут обладать анизотропией свойств [27]. В отличие от кристаллов, анизотропия свойств в материалах порошкового происхождения может формироваться не только на микро-, но и на мезоуровне [28]. В этом случае можно использовать известные для кристаллических систем упаковки ячеек материалов [28]. Чаще всего в результате прессования исходных порошков формируется трансверсальная анизотропия свойств [3], которая может быть реализована при кубической или гексагональной упаковке ячеек [29]. Например, механическое поведение среды с гексагональной упаковкой частиц, наиболее соответствующей трансверсальной анизотропии, полностью характеризуется пятью независимыми константами упругости и соответствующим числом скоростей распространения упругих волн. Функциональная связь между ними определяется известными зависимостями [26]:

$$\begin{aligned} \rho \left(V_{[001]}^l \right)^2 &= C_{33}, \\ \rho \left(V_{[001]}^t \right)^2 &= C_{44}, \\ \rho \left(V_{[001]}^l \right)^2 &= C_{11}, \\ \rho \left(V_{[100]}^{[120]} \right)^2 &= \frac{C_{11} - C_{12}}{2}, \\ \rho \left(V_{x'}^l \right)^2 &= \frac{C_{11} + C_{33} + 2C_{44}}{4} + \\ &+ \left[\left(\frac{C_{11} - C_{33}}{2} \right)^2 + (C_{33} + C_{44})^2 \right]^{1/2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, при неразрушающем контроле среды с гексагональной симметрией достаточно измерить пять скоростей распространения упругих волн в характерных направлениях и знать ее плотность для вычисления любой характеристики упругости.

Ограничения по применению рассмотренной концепции аналогичны предыдущему случаю. Поскольку эта модель требует достаточно трудоемких измерений, ее целесообразно применять только при необходимости получения характеристик упругости материала в различных направлениях. Исследования закономерностей процесса уплотнения порошкового железа в рамках этого подхода проведены нами в [29].

2.2. Статистически однородная сплошная линейно-упругая бездефектная среда

Если ограничения по однородности материала в соответствии с § 2.1 выполняются не строго (волновой размер структурных составляющих не более 0.1), то материал по отношению к акустическому полю является квазиоднородным (каждый репрезентативный объем материала обладает определенным количественно выраженным значением свойства, в то время как в элементарных объемах оно может отличаться от него). В этом случае эксплуатационные характеристики материала определяются своими эффективными величинами [16, 17, 25]. Для прогнозирования эффективных свойств поликомпонентных материалов по свойствам исходных компонентов можно применять различные подходы [4, 16, 17, 25, 27].

Поскольку в рамках этой модели при акустических измерениях происходит статистическое осреднение физических констант материала на длине волны, то эффективные скорости распространения упругих волн будут связаны с эффективными свойствами среды функциональными зависимостями, аналогичными соотношениям (1):

$$\begin{aligned} V_{l\varepsilon} &= \sqrt{\frac{E_\varepsilon(1-\mu_\varepsilon)}{\rho_\varepsilon(1+\mu_\varepsilon)(1-2\mu_\varepsilon)}}, \\ V_{t\varepsilon} &= \sqrt{\frac{E_\varepsilon}{\rho_\varepsilon(1+\mu_\varepsilon)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho_\varepsilon}}. \end{aligned} \quad (4)$$

где индекс “э” указывает на эффективное свойство материала.

В отличие от предыдущих моделей, здесь учитываются свойства исходных компонентов композита. Как и в предыдущих случаях, рассматриваются только характеристики упругости и инерции.

Возможности акустических методов для квазиоднородных материалов порошкового и волокнистого происхождения показаны нами в [9, 19, 22].

2.3. Неоднородная линейно-упругая бездефектная среда

Если ограничения по однородности материала в соответствии с § 2.1 не выполняются (волновой размер структурных составляющих достигает порядка 1), то поликомпонентный материал становится неоднородным по отношению к акустическому полю. Тогда посредством измерения акустических характеристик нельзя исследовать интегральные свойства материала, однако появляется возможность оценки размерных характеристик элементов структуры [16]. Такая оценка для пенометаллов проведена нами в [15].

2.4. Конструкции

Это объекты, изготовленные из элементов, в которых может существовать пространственно развитая волновая картина (волновой размер структурных составляющих – более 10). Возможности использования акустических полей в таких случаях исследованы нами в работе [18].

2.5. Дискретная среда

Для такой среды характерно отсутствие акустической связи между отдельными элементами [26]. В акустическом поле среда становится дискретной, если волновое расстояние между элементами структуры превышает единицу. При такой его величине существенно нарушается линейная связь между скоростью распространения и длиной упругой волны, что дает возможность с помощью акустических измерений оценивать расстояния между элементами структуры материала. Такая модель может быть использована для акустического исследования исходных компонентов композита в насыпанном состоянии, а также для композитов со слабо связанными элементами (например, прессовок порошковых материалов).

2.6. Квазиупругая среда

Отклонение от строгой упругости может вызываться различными причинами. Примером может служить упругая среда с малыми потерями. В этом приближении среда перестает быть идеально упругой [30]: путем введения потерь энергии упругих колебаний в ней дополнительно учитываются такие физические параметры, как тепло- и электропроводность, магнитные свойства, неоднородность. В рамках такой модели сохраняются основные соотношения (1) между скоростями распространения упругих волн и

упругими константами материала, однако все они приобретают смысл комплексных величин, где каждой скорости распространения упругой волны соответствует определенный коэффициент затухания – таким образом удваивается количество акустических характеристик состояния материала.

Для материалов с развитой мезоструктурой этот подход дает возможность повысить точность определения характеристик упругости материала. Кроме того, связь коэффициентов затухания упругой волны с особенностями строения и его неупругостью позволяет в результате измерения этих акустических характеристик получать дополнительную, качественно новую по сравнению с предыдущими моделями, информацию о свойствах и структуре материала [31, 32]. В рамках этой концепции нами показана возможность контролировать по акустическим характеристикам степень компактности и консолидации порошковых материалов [9, 20].

2.7. Нелинейно-упругая среда

В нелинейно-упругой среде связь напряжений и деформаций не подчиняется линейному закону. Поэтому в законе Гука учитываются члены второго порядка малости, а механическое поведение изотропной среды описывается дополнительно еще тремя модулями упругости третьего порядка, которые, в отличие от модулей упругости второго порядка, слабо чувствительны к структуре, являются структурно чувствительными [30]. Поэтому указанные величины могут быть использованы для исследования дефектности состояния материала или наличия в нем остаточных напряжений [11, 34]. Модули упругости третьего порядка связаны со скоростями распространения упругих волн посредством их зависимостей от статической нагрузки. [30]. Поэтому дополнительные измерения таких зависимостей позволяют получать качественно новые характеристики материала.

Реальные материалы с развитой мезоструктурой, как правило, обладают нелинейностью. Особенно сильно нелинейные эффекты проявляются в прессовках в результате компактирования порошков. Поэтому при решении ряда задач неучет нелинейных эффектов может привести к существенным погрешностям при исследовании свойств материалов. Нами показано, что зависимости скорости распространения и коэффициента затухания от статической нагрузки чувствительны к плоским дефектам порошковых материалов, получаемых в результате прессования [21].

2.8. Вязкоупругая среда

В этой модели, кроме упругости, учитывается вязкость среды. Для нее характерна зависимость конечного результата (полученного свойства материала) от пути его достижения [11]. Наличие вязкости существенно проявляется в слабо консолидированных материалах. Поэтому использование такого подхода полезно для акустического контроля на ранних стадиях технологического процесса изготовления поликомпонентного материала.

Возможны модели с другими комбинациями указанных параметров.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЕНОМЕТАЛЛОВ

В качестве примера практического применения предложенной методологии рассмотрим задачу контроля за изменением свойств пеноникеля и пенонихрома (см. рис. 1, в) в процессе их статического сжатия. В соответствии с предложенной классификацией, пенометаллы в зависимости от области волнового размера (см. рис. 7) можно рассматривать различным образом. В первой зоне – это континуальная бифазная нерегулярная каркасная структура, статистически изотропная квазиупругая с сильным рассеиванием колебательной энергии. Здесь ввиду сложности структуры материала расчет акустического поля невозможен. Исходя из этого, для акустического контроля свойств материала необходимо использовать корреляционные зависимости акустических характеристик со свойствами материала. В частности, можно использовать модель из § 2.3 для контроля характеристик упругости и дефектности. Нами показано, что при этом акустическими диагностическими параметрами могут служить скорость распространения упругой волны и крутизна фронта принимаемого сигнала [14]. Во второй зоне материал рассматривается как нерегулярная каркасная конструкция, статистически изотропная квазиупругая резонансная система. Для ее исследования может быть использована модель из § 2.6. Здесь нами установлена статистическая связь между размерами элементов конструкции и резонансными частотами их упругих колебаний [14]. Выбор возможности измерений в первой или второй зонах обеспечивался генерацией акустического поля в объекте контроля в соответствующем диапазоне частот.

Экспериментальная часть состояла из нескольких эталов. На первом этапе в соответствии с

методикой [14] были проведены измерения скорости распространения, крутизны фронта, а также спектральных характеристик сигнала. Затем образцы несколько раз подвергались статическому сжатию на испытательной машине типа “Инстрон” (испытания на сжатие проводились в Институте проблем материаловедения НАН Украины Н. П. Бродниковским), на каждой стадии деформирования материалов снова проводились измерения их акустических характеристик.

Результаты экспериментов показаны на рис. 9, а соответствующие изменения мезоструктуры материалов – на рис. 10.

Как видно из рис. 9, а, для пенометаллов характерна неоднозначная связь между напряжением и деформацией [35]. Полученные зависимости скорости распространения упругих волн и крутизны фронта принимаемого сигнала от степени деформации образцов хорошо коррелируют с соответствующими изменениями характеристик упругости.

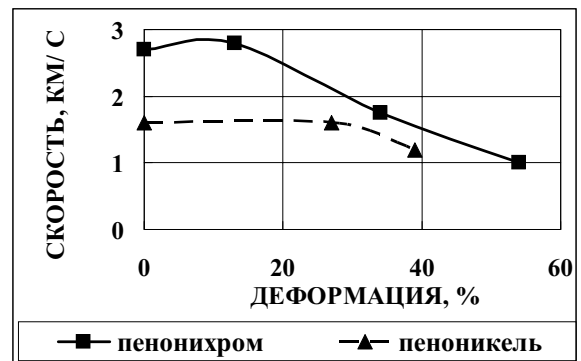
Анализ структурных изменений исследуемых материалов под воздействием нагрузки показал, что деформация образцов на начальной стадии происходит за счет изменения угла наклона перемычек в вертикальной плоскости. Перемычки постепенно стремятся принять горизонтальное положение, не разрушаясь при этом. Следовательно, значения частот максимумов спектра прошедшего через образец сигнала при небольших значениях деформации не должны существенно изменяться, что и подтверждается на практике. На следующем этапе начинают разрушаться самые длинные перемычки. Дольше всего сохраняются короткие перемычки, что соответствует спектральной картине: наилучшая повторяемость от эксперимента к эксперименту наблюдается для высокочастотных максимумов, соответствующих длине самой короткой перемычки.

Что касается характера структурных изменений под воздействием нагрузки, то пеноникель и пенонихром имеют свои индивидуальные особенности, отражающиеся и на акустических характеристиках (рис. 9, б, в). Так, пеноникель разрушается равномерно по всему объему, с увеличением нагрузки перемычки изгибаются, в них возникают трещины, изменяется конфигурация ячеек, они начинают проникать друг в друга.

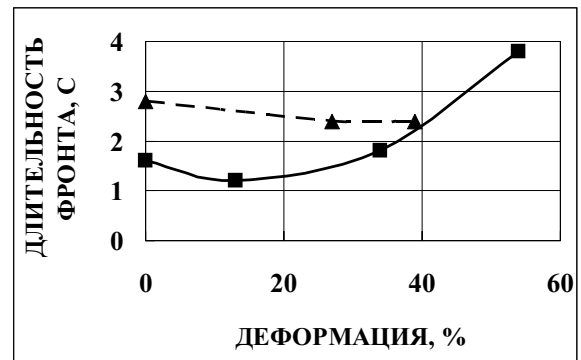
В образце пенонихрома структурные изменения в основном происходят в центральной плоскости. Перемычки больше изламываются, чем изгибаются, трещины появляются преимущественно в узлах под воздействием растяжения, возникающего при деформации ячейки, когда выходящие из



а



б



в

Рис. 9. Зависимости напряжений от деформаций (а) и соответствующие изменения скорости распространения упругих волн (б) и крутизны фронта принимаемого сигнала (в) в образцах из пенометаллов

узла перемычки наклоняются, стремясь принять горизонтальное положение. Ближе к поверхности перемычки практически не разрушаются, а форма ячеек изменяется незначительно. Как видно из рис. 9, б, в, изменения акустических характеристик при деформировании в этом материале суще-

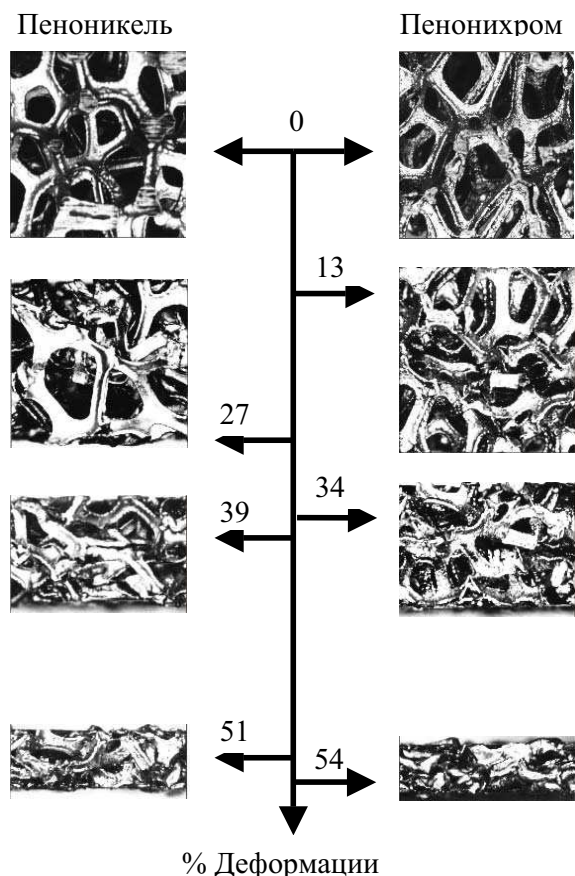


Рис. 10. Изменение структуры пенометаллов в процессе деформирования

ственно меньше.

Ухудшение прохождения высокочастотных ультразвуковых волн через материал происходит за счет нарушения целостности образцов: их смятия, появления трещин и т. п.

ВЫВОДЫ

В результате анализа особенностей формирования акустических полей в гетерофазных материалах с многоуровневой структурой выявлены условия для соотношений волновых размеров элементов макро-, мезо- и микро-уровней, при которых параметры формируемых в них акустических полей преимущественно отображают свойства макроуровня, ансамблей или отдельных элементов мезоуровня.

Предложены принципы управления информативностью акустических полей путем адаптации условий их формирования – съема к размерам

элементов структуры различных иерархических уровней материала по критерию достижения наибольшей чувствительности параметра акустического поля к искомому свойству среды.

В результате систематизации и обобщения на современном уровне знаний известных теоретических и экспериментальных исследований и опыта автора предложена оригинальная методология обоснования, разработки и использования акустических методов для решения практических задач прогнозирования, исследования и контроля физико-механических свойств, структуры и дефектности поликомпонентных материалов. Оригинальность методологии состоит во взаимно согласованной адаптации методов контроля, моделей исследуемых материалов и методик измерений к особенностям их структуры и свойств.

В рамках указанной методологии предложена классификация материалов с развитой мезоструктурой, отражающая их представление в виде эквивалентных акустических схем с учетом возможных решаемых задач контроля, особенностей структуры и свойств, а также волновых размеров контролируемых элементов структуры на исследуемом иерархическом уровне.

В рамках этой методологии показана возможность выбора акустических методов и оптимизации их параметров для получения информации об интегральных, эффективных и локальных характеристиках материала на разных иерархических уровнях. Предложена отражающая эти задачи классификация акустических методов с учетом разветвленной структуры и свойств материалов и их составляющих на различных иерархических уровнях. К указанным характеристикам относятся упругие и неупругие константы с учетом анизотропии, размерные характеристики элементов структуры, качество контактов между последними, наличие дефектов. Даны практические рекомендации по выбору акустических методов в конкретных условиях.

Проведен анализ моделей сред и рассмотрены связи акустических характеристик материала с другими его свойствами в рамках рассматриваемых моделей. Результаты анализа акустических полей в пенометаллах показали, что их характер определяется среднестатистическими волновыми размерами структурных составляющих. Так, при малых волновых размерах элементов мезоструктуры материал ведет себя как сплошной. В этом случае по скорости распространения упругой волны можно судить о его упругости, а по потерям энергии – о неупругости. Обе эти характеристики чувствительны к степени разрушения материала.

При волновых размерах элементов мезоструктуры, близких к единице, наблюдаются резонансные явления элементов мезоструктуры. В этом случае по резонансным частотам можно проводить оценку их размеров и контролировать степень разрушения материала. Таким образом, выбирая параметры излучаемого в образец сигнала, можно либо проводить контроль эффективных макроскопических характеристик материала, либо исследовать состояние его структурных элементов на мезоуровне.

1. Косторнов А. Г. Пористые материалы: научные основы формирования свойств и эффективного применения // Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя / Відп. ред. І. К. Походня.– К.: Наук. думка, 1998.– С. 447–472.
2. Von de Voorde M. New trends in materials science and technology // Тез. докл. Международ. конф. “Современное материаловедение: достижения и проблемы”.– Киев, 2005.– С. 5–6.
3. Роман О. В., Скороход В. В., Фридман Г. Р. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии.– Минск: Вышэйшая школа, 1989.– 182 с.
4. Скороход В. В. Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах // Порошковая металлургия.– 1995.– N 1/2.– С. 53–71.
5. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В. В. Клюева.– М.: Машиностроение, 2003.– 656 с.
6. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов.– М.: Металлургия, 1991.– 752 с.
7. Безымянный Ю. Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошковая металлургия.– 2001.– N 5/6.– С. 23–33.
8. Николенко А. Н., Ковальченко М. С. Иерархическая структура, уровни описания, классификация моделей и анализ процессов уплотнения порошковых материалов // Порошковая металлургия.– 1989.– N 6.– С. 29–33.
9. Безымянный Ю. Г. Использование акустических характеристик для контроля структуры пористых материалов // Электронная микроскопия и прочность материалов.– Киев, 1999.– С. 93–105.
10. Ніколенко А. М. Концепція ієрархічної структури матеріалів // Порошковая металлургия.– 2002.– N 5/6.– С. 105–127.
11. Никул У. К. Нелинейная акустодиагностика.– Л.: Судостроение, 1981.– 252 с.
12. Скороход В. В., Солонин С. М. Физико-механические основы спекания порошков.– М.: Металлургия, 1984.– 159 с.
13. Безымянный Ю. Г., Куцевский А. Е. Опыт совершенствования стандартов на методы определения свойств металлических порошков и спеченных изделий // Порошковая металлургия.– 2003.– N 1/2.– С. 106–113.
14. Безымянный Ю. Г. Особенности акустических измерений при импульсном зондировании материалов, изготавливаемых методами порошковой металлургии // Современные проблемы физического материаловедения. Сер. Физико-химические основы технологии порошковых материалов.– К.: ИПМ НАНУ, 2005.– С. 190–201.
15. Безымянный Ю. Г., Козирацкий Е. А., Талько О. В. Акустическое отображение внутреннего строения и свойств композиционных материалов и его компьютерная интерпретация // Электронное строение и свойства тугоплавких соединений и сплавов и их использование в материаловедении.– К.: ИПМ НАНУ, 2004.– С. 111–122.
16. Кунин И. А. Теория упругих сред с микроструктурой. Нелокальная теория упругости.– М.: Наука, 1975.– 416 с.
17. Кристенсен Р. Введение в механику композитов.– М.: Мир, 1982.– 336 с.
18. Безымянный Ю. Г. Особенности использования акустических методов при контроле качества слоистых материалов // Порошковая металлургия.– 1999.– N 5/6.– С. 24–29.
19. Безымянный Ю. Г., Куцевский А. Е., Сиденко Р. В. Акустическое отображение нерегулярности формирования свойств полидисперсного порошкового железа // Электроника и связь.– 2005.– N 28.– С. 78–82.
20. Безымянный Ю. Г., Талько О. В. Анализ возможностей акустических методов при контроле контактообразования в порошковых материалах // Электроника и связь.– 2006.– N 1(30).– С. 48–57.
21. Безымянный Ю. Г., Талько О. В. Анализ возможностей акустических методов по выявлению дефектности контактов в порошковых материалах // Техн. диагност. неразруш. контроль.– 2006.– N 2.– С. 39–45.
22. Безымянный Ю. Г., Козирацкий Е. А. Отображение свойств волокнистых материалов по скорости распространения упругих волн // Акуст. вісн.– 9, N 1.– 2006.– С. 15–20.
23. Ермолов И. Н. Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии, задачи и перспективы // Дефектоскопия.– 2004.– N 10.– С. 13–48.
24. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Том 7: Теория упругости.– М.: Наука, 1987.– 248 с.
25. Руцицкий Я. Я., Цурпал С. І. Хвилі в матеріалах з микроструктурою.– К.: Ін-т механіки НАНУ, 1997.– 377 с.
26. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов.– М.: Наука, 1982.– 424 с.
27. Бальшин М. Ю., Кипарисов С. С. Основы порошковой металлургии.– М.: Металлургия, 1978.– 184 с.
28. Кингери У. Д. Введение в керамику.– М.: Изд-во лит. по строит, 1967.– 500 с.
29. Безымянный Ю. Г., Скороход В. В., Талько О. В., Фридман Г. Р. Исследование анизотропии свойств порошкового железа // Порошковая металлургия.– 2006.– N 3/4.– С. 88–97.
30. Шутитов В. А. Основы физики ультразвука.– Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980.– 280 с.
31. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела.– М.: Мир, 1972.– 308 с.

32. *Физическая акустика. Том 3, часть А: Влияние дефектов на свойства твердых тел / Под ред. У. Мэзона.*– М.: Мир, 1969.– 580 с.
33. *Физическая акустика. Том 4: Применение физической акустики в квантовой физике и физике твердого тела / Под ред. У. Мэзона.*– М.: Мир, 1969.– 436 с.
34. *Зарембо Л. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику.*– М.: Наука, 1966.– 520 с.
35. *Скороход В. В., Леонов А. Н., Солонин С. М., Каташинский В. П., Слысь И. Г., Рутковский А. Е., Барабаш В. А. Особенности деформации высокопористых металлических материалов // Порошковая металлургия.*– 2002.– N 5/6.– С. 32–40.