

ПРИНЦИПЫ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТОДИАГНОСТИКИ ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.Г.БЕЗЫМЯННЫЙ

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

Рассмотрены модели упругого твёрдого тела, в рамках которых могут производиться экспериментальные исследования нелинейных эффектов в малоинтенсивных акустических полях поликомпонентных материалов, получаемых методами порошковой металлургии. Для каждой модели проведен анализ применимых для нелинейной акустодиагностики параметров. Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие возможности практического использования указанных моделей для нелинейной акустодиагностики поликомпонентных материалов.

ВВЕДЕНИЕ

Нелинейная акустодиагностика материалов и изделий в настоящее время во многих странах мира находится на передовых рубежах развития акустических методов неразрушающего контроля [1-5]. С её помощью удаётся расширить возможности, повысить точность и достоверность получения информации о свойствах, структуре и дефектности материалов. В основе её использования лежат физические и математические модели, отражающие нелинейную связь параметров акустических полей со свойствами материала. Формализовать такую связь в виде корреляционной или функциональной зависимости не всегда просто даже для однородных материалов [6]. В подавляющем большинстве указанных и других известных работ используют нелинейные эффекты в акустических полях конечных амплитуд.

К поликомпонентным материалам относятся, в частности, материалы, получаемые методами порошковой металлургии, и различного вида композиты [7]. Эти материалы востребованы во многих отраслях промышленности, поэтому их постоянно совершенствуют в соответствии с повышающимися требованиями научного и технического прогресса, часто путём усложнения структуры. В результате возникает необходимость разработки адекватных методов их исследования и контроля [8]. Неоднородность структуры поликомпонентных материалов при определённых условиях приводит к появлению нелинейных эффектов в создаваемых в них акустических полях. Структурная нелинейность в таких материалах может многократно превышать другие виды нелинейности. Для реальных поликомпонентных материалов возникает возможность практического использования нелинейных эффектов в акустических полях бесконечно малых амплитуд. Этот вопрос в настоящее время слабо изучен. Целью работы является обоснование методов нелинейной акустодиагностики свойств поликомпонентных материалов при использовании малых амплитуд упругой волны. Практическое использование методов нелинейной акустодиагностики, как и каждого косвенного метода, предполагает использование модельных представлений, в рамках которых диагностический параметр связан с исследуемым свойством материала.

1. АНАЛИЗ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Характерным представителем материалов, получаемых методами порошковой металлургии, является порошковое железо [7]. Структура порошкового железа показана

на рис. 1 (х 16). Материал получают постадийно. При этом обязательно присутствуют стадии прессования и спекания. Возможны дополнительные стадии обработки материала. На рис. 2 в виде структурных моделей отображён процесс получения такого материала (а – свободно насыпанный исходный порошок материала, б – прессовка, в – процесс спекания, г – спеченный материал). Анализ структуры материала и особенностей формирования в нём акустических полей проведен нами в [8]. В результате этого анализа можно отметить, во-первых, что порошковый материал и его полуфабрикаты имеют развитую мезоструктуру, т.е. структурно неоднородны, во-вторых, с точки зрения источников проявления нелинейных эффектов в акустических полях можно выделить такие элементы структуры: несовершенные контакты между частицами (в свободно насыпанном порошке – соприкосновение за счёт веса порошинок, в прессовках – механическое сцепление, в процессе спекания – постепенная замена механического сцепления на химическое соединение, в спеченном материале – дефекты спекания), плоские поры. Наибольший уровень нелинейности присущ акустическим полям в свободно насыпанном порошке, а наименьший в идеально спеченном материале. Можно сделать вывод, что для любой стадии получения порошкового материала характерны все виды [1] акустической нелинейности: геометрическая (обусловленная нелинейностью уравнения движения или уравнения непрерывности), физическая (обусловленная отклонением от линейности закона Гука) и структурная (обусловленная неоднородностью среды).

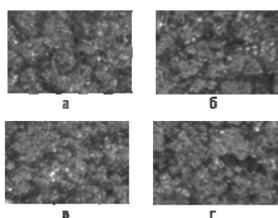


Рис. 1.

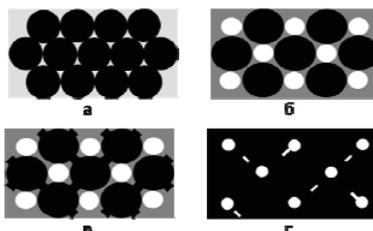


Рис.2.



Рис. 3.

2. НЕЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Широко используемая при экспериментальных исследованиях для традиционных материалов модель линейно-упругой идеальной сплошной однородно изотропной твердой среды [10], в которой по диагностическим параметрам V_1 и V_t можно определить все характеристики упругости материала:

$$V_{0l} = \left(\frac{E_0(1-\mu_0)}{\rho_0 \cdot (1+\mu_0)(1-2\mu_0)} \right)^{1/2}; \quad V_{0t} = \left(\frac{E_0}{\rho_0 \cdot (1+\mu_0)} \right)^{1/2} = \left(\frac{G_0}{\rho_0} \right)^{1/2}; \quad (1)$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; G – модуль сдвига; V – скорость распространения упругой волны; "l" и "t" – индексы, относятся к продольной и поперечной упругим волнам, соответственно, "0" – индекс, указывающий на структурную однородность – для структурно неоднородных материалов становится неприменимой.

2.1. Линейно-упругая изотропная твердая среда с эффективными свойствами

В этой модели порошковый или другой материал, структуру которого можно рассматривать как статистически однородную, заменяют эквивалентным однородным,

свойства которого совпадают с эффективными свойствами исследуемого материала (рис. 3). Усреднение свойств исследуемого материала может производиться разными способами. [11] Тогда формула (1) остаётся справедливой, если все входящие в неё величины считать эффективными (индекс "0" меняем на "э"). Экспериментально определяемые диагностические параметры – эффективные значения $V_{эl}$ и $V_{эt}$ – включают в себя структурную нелинейность материала. По ним можно определить все эффективные характеристики упругости материала. Возможно выделение диагностических параметров, связанных с чисто нелинейными эффектами.

В соответствии с этой моделью проводят испытания на многоцикловую усталость материалов при высокочастотном резонансном деформировании в мощных акустических полях образцов материалов. [12] При этом результатом структурной неоднородности материала является накопление дефектов под действием циклических нагрузок, не превышающих предела упругости материала, с последующим развитием усталостной трещины. Контроль этих процессов может осуществляться с помощью нелинейных диагностических параметров: амплитуды третьей гармоники резонансной частоты испытываемого образца материала; изменения величины управляющего напряжения, обеспечивающего неизменную амплитуду деформации в процессе усталостных испытаний [13]. Отражением нелинейных эффектов в этом случае так же является появление сигналов акустической эмиссии, по параметрам которых можно диагностировать состояние материала [14]. Другими примерами использования этой модели могут служить исследования неоднородности или немонотонности формирования структуры порошкового материала при различных условиях прессования [8, 15].

2.2. Кусочно-линейно упругая (нелинейная двухмодульная) твёрдая среда

По сравнению с предыдущей, модель учитывает разницу в свойствах порошкового материала при растяжении и сжатии за счёт наличия несовершенных контактов и плоских дефектов [7]. Например, для модельного материала Д16чАТ с трещиной [16] зависимость напряжения от деформации (рис. 4 а) при растяжении (пунктирная кривая) ниже, чем при сжатии (штрих-пунктирная кривая).

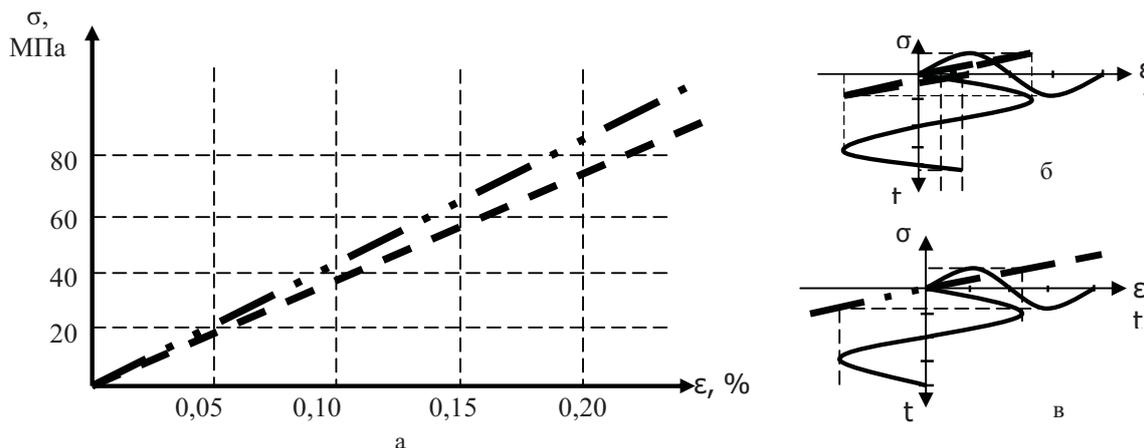


Рис. 4.

В этом случае возможно по крайней мере, два варианта: модули упругости отличаются при растяжении и при сжатии (б) и модули упругости отличаются при положительной и отрицательной нагрузке (в). Даже чисто феноменологический подход показывает, что такие системы нелинейны, поскольку воздействие гармонического

напряжения на них вызывает нелинейный отклик деформации (δ , ν). При этом первая система становится неравновесной (δ). Известно практическое применение этой модели для обнаружения непроклеев слоистых пластиков [1]. Однако вызывает большое сомнение, что акустическое поле бесконечно малых амплитуд даст существенную для практического обнаружения разницу в модулях упругости. Поэтому более перспективным при использовании данной модели следует считать совместное воздействие статической и динамической нагрузок [17].

2.3. Упругая сплошная изотропная твёрдая среда с потерями и эффективными свойствами

По сравнению с предыдущими, модель учитывает потери колебательной энергии в материале и более точно отображает состояние материала. Это достигается за счёт того, что эффективные модули упругости и скорости становятся комплексными, включая в себя эффективную структурную нелинейность материала, а формула (1) приобретает вид [10]:

$$\tilde{V}_l = \left(\frac{\tilde{E}(1-\mu_0)}{\rho_0 \cdot (1+\mu_0)(1-2\mu_0)} \right)^{1/2}; \quad \tilde{V}_t = \left(\frac{\tilde{E}}{\rho_0 \cdot (1+\mu_0)} \right)^{1/2} = \left(\frac{\tilde{G}}{\rho_0} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$\tilde{V}_{l,t}$ где – комплексные скорости распространения УВ; α - коэффициент затухания УВ;

$\tilde{E} = E + \text{Im}(\tilde{E})$ $\tilde{G} = G + \text{Im}(\tilde{G})$ – комплексные модули упругости, мнимая часть которых определяется α .

В рамках этой модели состояние материала характеризуют эффективные диагностические параметры V_l , V_t , α_l и α_t . Составляющая затухания упругой волны, связанная с диссипацией энергии, может служить чисто нелинейным диагностическим параметром. Возможно выделение других диагностических параметров, связанных с чисто нелинейными эффектами.

В соответствии с этой моделью можно контролировать накопление дефектов под действием циклических нагрузок [13], исследовать процессы уплотнения, контактообразования порошковых материалов, неоднородность или немонотонность формирования их структуры при различных условиях прессования [9, 18-20]. Если структурная нелинейность выражена настолько сильно, что невозможно применять традиционные акустодиагностические параметры, например при исследовании высокопористых материалов, могут быть использованы специальные диагностические параметры: крутизна фронта принимаемого сигнала, резонансные частоты структурных составляющих, групповая скорость распространения акустического сигнала [21].

2.4. Нелинейно-упругая сплошная однородная изотропная твёрдая среда

Эта модель учитывает нелинейность деформаций в материале [10], в результате чего состояние материала, помимо двух линейных модулей упругости, дополнительно описывается тремя модулями упругости третьего порядка. Причём, если линейные модули упругости являются слабо структурно чувствительными, то нелинейные – чувствительны к структурным особенностям материала. Диагностическими параметрами в этой модели, помимо продольной и поперечной, являются скорости распространения упругих волн с различной поляризацией, измеренные при тех или иных статических напряжениях. Нами показана [17] на модельном эксперименте и непосредственно на порошковом железе перспективность такого подхода. Известны и другие работы по тензоупругости, подтверждающие этот факт [1].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для поиска эффективных диагностических параметров нелинейной акустодиагностики был проведен модельный эксперимент [16], результаты которого проверены на порошковых материалах. На рис. 5 показаны амплитудные характеристики, измеренные методом непрерывной синусоиды, для материалов: спеченного порошкового железа (а, первая и вторая гармоники), алмазных композитов с различным качеством спекания (б, вторые гармоники), прессовок на основе медного порошка с вольфрамовыми включениями при разном качестве контактов (в, первые и вторые гармоник; г, вторые гармоники при разных частотах возбуждения).

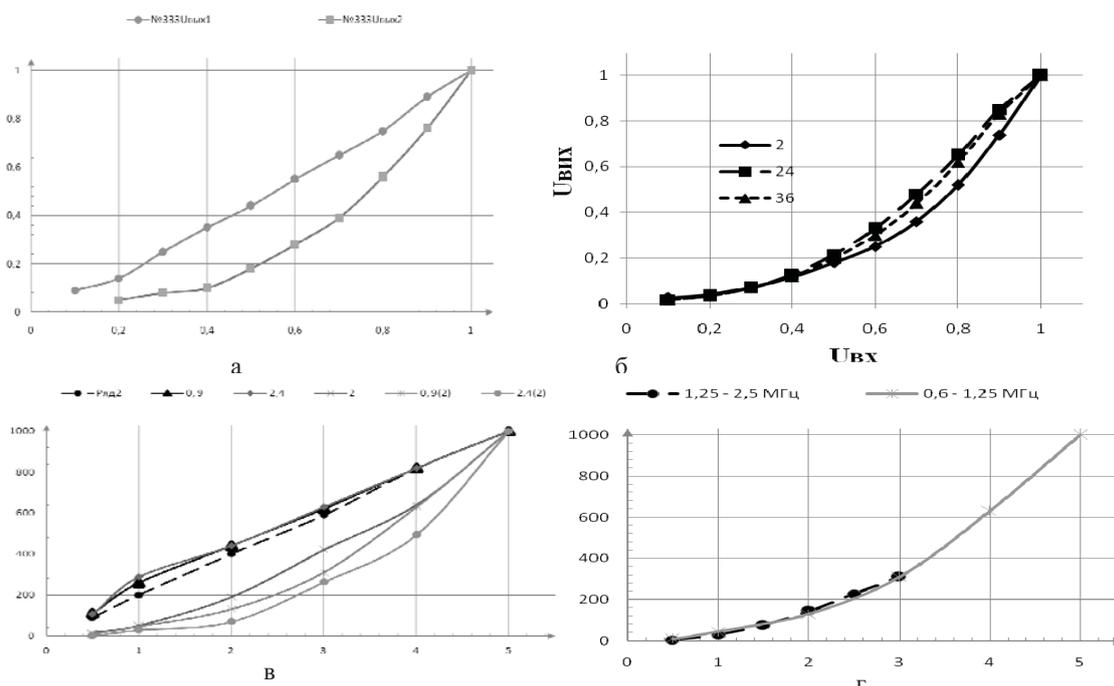


Рис. 5.

Несмотря на то, что полученные результаты носят качественный характер, из рис.4 видно, что параметры амплитудных характеристик материала на второй гармонике могут быть использованы для диагностики состояния порошковых материалов.

ВЫВОДЫ

В результате работы показано, что для экспериментальных исследований нелинейных эффектов в малоинтенсивных акустических полях поликомпонентных материалов, получаемых методами порошковой металлургии могут быть выбраны различные модели упругого твёрдого тела. В рамках каждой модели могут использоваться различные диагностические параметры, которые непосредственно или косвенно отражают нелинейные эффекты в акустических полях этих материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2006. – 864 с.

2. Sasaki R., Ogata T. et al. Simulation and analysis of subharmonics and tail effect of ultrasonic nondestructive evaluation of closed cracks. *Jap. J. Appl. Phys. Pt 1*, 2008, 44, No 6B, p. 4389-4393.
3. Braunbruck A., Ravasso A. Nonlinear interaction of waves with material inhomogeneity. *Proc. Estonian Acad. Sci. Phys. Math.* 2003, 52, No 1, p. 157-168.
4. Kim Kyung Cho, Yamawaki Hisashe et al. Research on the nondestructive measurements of nonlinear elastic modulus by using ultrasonic wave. *JSME Int. J. A.* 2008, 44, No 3, p. 383-389.
5. Johnson P., Sutin A. Slow dynamics and anomalous nonlinear fast dynamics in diverse solids. *J. Acoust. Soc. Amer.* 2009, 117, No 1, p. 124-130.
6. Руцицький Я.Я., Цурпал С.І. Хвилі в матеріалах з мікроструктурою. К.: Інститут механіки ім. Тимошенка. Національна академія наук України, 1997. – 377 с.
7. Бальшин М.Ю., Кипарисов С.С. Основы порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1978. – 184 с.
8. Роман О.В., Скороход В.В., Фридман Г.Р. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. – Минск: Выш. шк., 1989. – 182 с.
9. Безымянный Ю.Г., Талько О.В. Анализ возможностей акустических методов при контроле контактообразования в порошковых материалах // *Электроника и связь*. – 2006. – № 1. – С. 48–57.
10. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука. – Л.: Ленингр. ун-т, 1980. – 280с.
11. 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.
12. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / Под ред. В.А.Кузьменко. – К.: Наук. думка, 1979. 336 с.
13. Безымянный Ю.Г., Васинюк И.М., Крук Б.З. Некоторые результаты контроля усталостной поврежденности образцов из сплава Д16Т при высоких частотах нагружения / Сб. материалов Междунар.симпоз «Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. – К.: Наук. думка, 1986. – С. 2698–275.
14. Безымянный Ю.Г., Галаненко Д.В. Развитие акустико-эмиссионного метода для исследования процесса многоциклового усталости материалов // *Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів. (Серія). Випуск 13: Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій.* – Зб. наук. праць. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України. – 2008. – 288с. – с.100-106.
15. Безымянный Ю.Г., Кушевский А.Е., Сиденко Р.В. Акустическое отображение нерегулярности формирования свойств полидисперсного порошкового железа // *Электроника и связь*. – 2005. – № 28 – С. 78–82.
16. Ю. Безымянная, К.А. Комаров, О.В. Талько. Исследование нелинейных эффектов в акустическом поле материала с усталостной трещиной // *Акустический симпозиум «Консонанс-2009»*: Збірник праць. - Київ, 2009 р. – С.
17. Безымянный Ю.Г., Талько О.В. Анализ возможностей акустических методов по выявлению дефектности контактов в порошковых материалах // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2006. – №. 2. – С. 39–45.
18. Безымянный Ю.Г. Использование акустических характеристик для контроля структуры пористых материалов // *Электронная микроскопия и прочность материалов: Сб. научн. тр.* – К., 1999. – С. 93–105.
19. Безымянный Ю.Г., Вдовиченко А.В., Кузьменко В.А. Некоторые результаты акустических исследований материалов, изготавливаемых методами порошковой металлургии. – К., 1994. – 63 с. (Препр. / НАН Украины. ИПМ; 94-4.).
20. Безымянный Ю.Г., Кушевский А.Е., Мешкова Г.А. Акустический контроль порошкового железа // *Акустический симпозиум «Консонанс-2005»*: Збірник праць. - Київ, 2005 р. – С. 68–73.
21. Безымянный Ю.Г. Акустическое отображение материалов с развитой мезоструктурой // *Акустичний вісник*. – 2006. –Т. 9, № 2. – С. 3–16.