

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОСТИ МНОГОФАЗНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

**Ю.Г. БЕЗЫМЯННЫЙ, Е.А. КОЗИРАЦКИЙ, А.Н. КОЛЕСНИКОВ,
Л.О. ТЕСЛЕНКО, О.В. ТАЛКО**

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

В работе исследованы факторы, влияющие на формирование характеристик упругости многофазных порошковых материалов в процессе их изготовления. Путем структурного, акустического и математического моделирования, а также анализа экспериментальных данных показано, что для повышения достоверности определяемых величин динамических модулей упругости и уменьшения расхождения между значениями, получаемыми разными методами, необходима их адаптация к особенностям структуры аттестуемого порошкового материала.

ВВЕДЕНИЕ

Модули упругости – фундаментальные характеристики твердого тела [1]. Они являются расчетными параметрами в аналитическом аппарате физической теории деформации и разрушения твердого тела, входят во все уравнения механики твердого тела и служат основными параметрами в конструкторских расчетах сооружений, машин и механизмов. Модули упругости традиционных материалов можно найти в справочнике, но для вновь создаваемых материалов необходимо эти модули измерить. Для определения модулей упругости используют динамические методы, в основе которых лежат измерения скоростей распространения упругих волн. Чем сложнее материал, тем больший разброс приведенных в справочниках значений его характеристик упругости и меньше их достоверность [2]. Это обусловлено не всегда обоснованным применением стандартных методов измерений для нетрадиционных материалов, влиянием большего рассеивания их свойств и вариативностью технологических режимов получения [3]. Целью работы является выявление факторов, влияющих на формирование характеристик упругости многофазных порошковых материалов, разработка рекомендаций по адаптации акустических методов экспериментальной оценки этих характеристик к особенностям конкретного материала для повышения достоверности результатов оценки, экспериментальное подтверждение и систематизация факторов влияния на материалах с различными свойствами, использование характеристик упругости для отработки технологии создания порошковых материалов.

1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Многофазный порошковый материал – это результат синтеза исходных порошков, имеющих различные свойства, с целью получения путём прессования и спекания при различных технологических режимах нового материала, удовлетворяющего заданным эксплуатационным требованиям [4]. Для таких материалов характерно наличие сложной многоуровневой структуры, вариативность исходных компонентов и технологий получения, а также результирующих структур материалов, влияние большого числа

факторов на формирование характеристик упругости, значительный разброс их значений, приведенных в литературе.

На рис. 1а показан пример микроструктуры трёхфазного порошкового материала. Это композиты на основе фаз высокого давления углерода (5 %) и нитрида бора (95 %). Третья фаза представляет собой межчастичные поры. Упрощённая структурная модель такого материала показана на рис. 1б. Модель отображает размеры, концентрацию и свойства исходных компонентов, но не позволяет оценить результаты взаимодействия частиц после технологического воздействия.

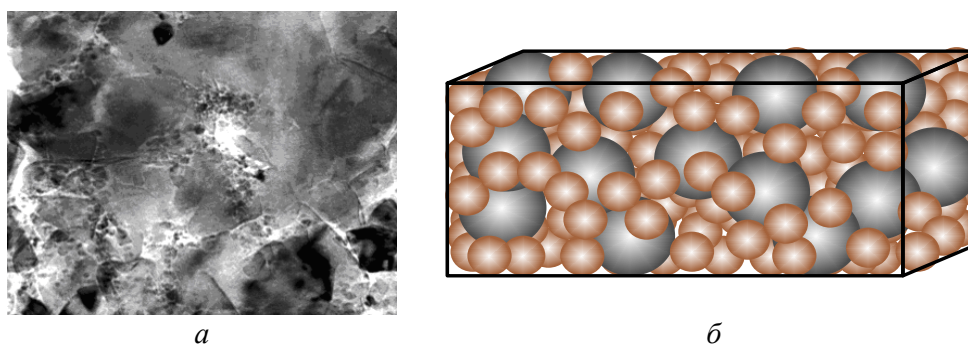


Рис. 1. Микроструктура (а) и модель (б) трёхфазного порошкового материала

Для оценки характеристик упругости гомогенного изотропного материала по результатам акустических измерений используется известная [5] связь между измеренными скоростями распространения упругих волн и характеристиками упругости.

$$c_{l_{изм}} = \sqrt{\frac{E_3(1-\nu_3)}{\rho_3(1+\nu_3)(1-2\nu_3)}}, \quad c_{t_{изм}} = \sqrt{\frac{E_3}{\rho_3(1+\nu_3)}} = \sqrt{\frac{G_3}{\rho_3}}, \quad c_{cm_{изм}} = \sqrt{\frac{E_3}{\rho_3}} \quad (1)$$

где c_l , c_t , c_{cm} – скорости распространения продольной, поперечной и упругой волны в стержне. E_3 , G_3 , ν_3 , ρ_3 – модули Юнга и сдвига, коэффициент Пуассона и плотность.

Характеристики упругости многофазных порошковых материалов принимаются как эффективные, отображающие интегральные свойства неоднородного материала [6]. Для эффективных величин при определённых условиях формулы (1) остаются справедливыми. Эти условия можно создать, если обеспечить адаптацию акустических методов к особенностям материала и его образцов.

2. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОСТИ МНОГОФАЗНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методология такой адаптации акустических методов к особенностям структуры материала описана в [7]. Применительно к измерению характеристик упругости она состоит в следующем: путём анализа особенностей материала, структурного, акустического и математического моделирования выбрать для каждого используемого динамического метода такие параметры сигналов, которые обеспечили бы корректное использование формул (1) или другой математической модели эксперимента.

Если отталкиваться от структурной модели (см. рис. 1б) с учётом того, что характеристики упругости являются интегральными свойствами материала, то для их

корректного измерения динамическими методами необходимо выполнить следующие требования: во-первых, длина упругой волны λ должна быть больше размера самого крупного элемента структуры, по крайней мере, на порядок, что позволит на длине волны считать материал однородным, или, по крайней мере, статистически однородным; во-вторых, образец материала должен быть репрезентативным для исследования интегральных свойств многофазного порошкового материала, т.е., в идеале, его объём, должен содержать не менее 1000 самых крупных элементов структуры (реально их может быть не менее 350); в-третьих, указанное количество элементов должно попадать в прозвучиваемую часть образца.

Для выполнения первого требования необходимо построить акустическую модель материала (рис. 2). Её строят по известным значениям характерных размеров образца (L) и элементов структуры материала (d_1, d_2) в соответствии с рекомендациями [7] путём отображения оси размеров x на ось волновых размеров x/λ и учёта волновых размеров элементов исследуемых объектов. Коэффициент K_m условно связан с акустическим отображением свойств материала. Промежуточная ось $\lg(x/d_2)$ делит зону измерений на две большие области: в одной ($0-n$) возможны измерения эффективных характеристик материала, а во второй ($k-0$) – только исследования внутренней структуры. Акустическая модель, по известным свойствам исходных порошков и характерному размеру образца, позволяет оптимизировать рабочую частоту f измерений. Так, для резонансного метода рабочую частоту выбирают в соответствии с формулой $L/\lambda = 1$, где $\lambda = c/f$, c – скорость упругой волны в материале. Для импульсного метода оптимальной для измерений эффективных характеристик материала будет область 1_{d2L} , лежащая в пределах волновых размеров $d_2/\lambda \ll x/\lambda \ll L/\lambda$. Если эта область отсутствует из-за соотношения размеров структурных элементов и образца, то возможно измерение и в областях 2_{d2} и 2_L , ограниченных волновыми размерами $d_2/\lambda < x/\lambda < L/\lambda$. В двух последних областях проводить измерения методически сложнее.

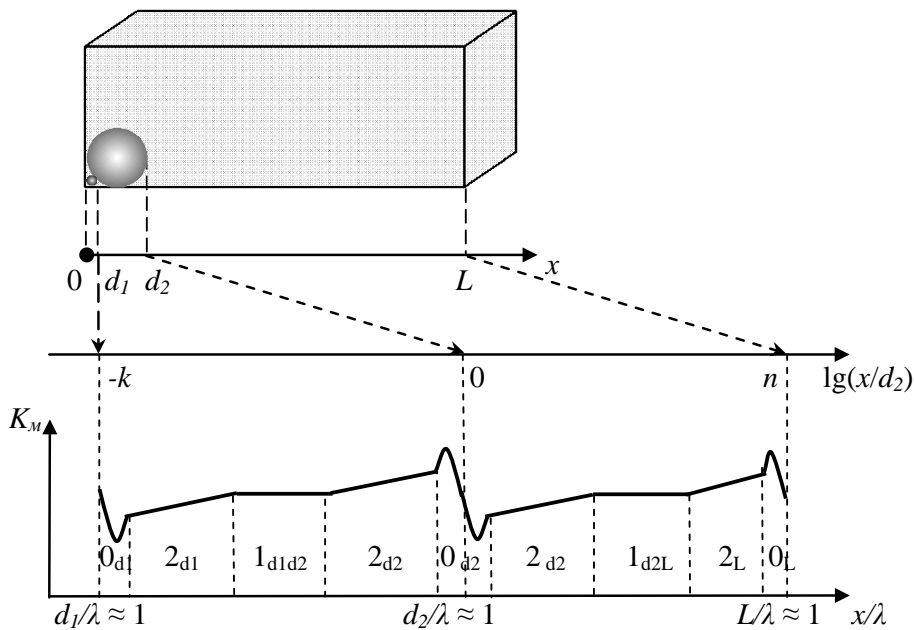


Рис. 2. Акустическая модель порошкового материала

Выполнение второго и третьего требований поясняется рис. 3. Свойства материала будут статистически усредняться внутри озвучиваемого объема $V_{оз}$, если выполняется соотношение [7] $V_{оз} \gg 350(d_2/2)^3$, что позволяет измерять эффективные характеристики материала (а). Если $V_{оз} > 350(d_2/2)^3$, то статистическое усреднение не достигается внутри озвучиваемого объема, но может быть достигнуто путём многократных измерений в разных участках образца, если он в целом репрезентативный (б). При озвучивании в соответствии с (в) эффективные характеристики материала не могут быть измерены из-за неодинакового влияния структуры на результаты измерений в различных участках материала.

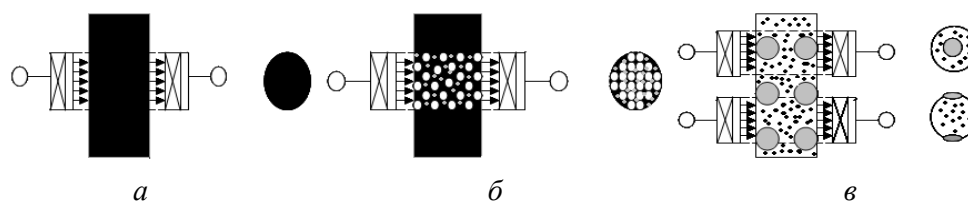


Рис. 3. Варианты прозвучивания гетерогенного материала:
 а – область однородных измерений, б – область статистического усреднения;
 в – область неоднородных измерений

Выполнение всех трёх требований позволяет усреднить свойства материала на длине упругой волны и в озвучиваемом объеме, что обеспечивает адаптацию параметров метода измерений к особенностям конкретного образца материала и позволяет корректно строить эксперимент по измерению его динамических характеристик упругости. Однако, в каждом эксперименте использование формул (1) дополнительно требует проверки материала на изотропность.

Возможность адаптации методов оценки динамических модулей упругости к особенностям исследуемого образца материала позволила нам провести цикл измерений [8-18] в многофазных порошковых материалах, отличающихся исходными компонентами, технологией получения, свойствами материала, геометрией его образцов, установить и систематизировать факторы, которые влияют на результаты оценки величин динамических модулей упругости.

Результаты исследований сведены в табл. В процессе исследований было установлено, что измеренные экспериментально величины динамических модулей упругости хорошо отражают особенности технологии получения материалов и поэтому могут быть использованы для отработки технологического процесса на этапе разработки материала.

ВЫВОДЫ

Выявлены факторы, влияющие на оценку характеристик упругости многофазных порошковых материалов с использованием акустических измерений.

Разработаны рекомендации по адаптации акустических методов экспериментальной оценки этих характеристик к особенностям конкретного материала для повышения достоверности результатов измерений.

Проведен цикл экспериментальных исследований на материалах с различными свойствами, в результате которого подтверждены факторы влияния, проведена их

систематизация и показаны причины большого разброса литературных данных по значениям модулей упругости многокомпонентных порошковых материалов.

Показана эффективность использования динамических характеристик упругости для отработки технологии создания порошковых материалов.

Таблица. Факторы, влияющие на величину динамического модуля упругости

Класс факторов		Факторы влияния	Источник
1	Исходные компоненты	Размер и форма частиц	[8,12,16,18]
		Физические свойства частиц	[8,12,14-18]
		Объемная доля компонентов	[8,9,14-16]
2	Особенности материала	Морфология	[8,9,12,15,18]
		Анизотропия	[8,16]
		Пористость	[8,16]
		Дефектность	[9]
		Неоднородность	[10,12,13,15]
3	Технология изготовления	Подготовка смеси	[9,15,17]
		Давление и вид прессования	[8,14]
		Режимы и вид спекания	[11,12,15,17,18]
		Химическое взаимодействие частиц	[12,15]
4	Метод измерений	Импульсный или резонансный	[10]
5	Геометрия образца	Форма и размеры образца	[18]

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теория упругости. – М., 1965.
2. Францевич И. Н., Воронов Ф. Ф., Бакута С. А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Справочник. – К.: Наукова думка, 1982. – 285 с.
3. Безымянный Ю. Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов. // Порошковая металлургия. – 2001. – № 5-6. – С.23–33.
4. Гайдученко А. К. Порошковые металлические материалы. // Неорганическое материаловедение: Энциклопед. изд.: В 2 т. / Под ред. Г.Г.Гнесина, В.В.Скорехода. – Т.2. Кн. 2. П – Э: Материалы и технологии. – К.: Наук. думка, 2008. – С.114–124.
5. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука.– Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980.– 280 с.
6. Скореход 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.

7. *Безмянний Ю. Г.* Акустичний контроль матеріалів з розвинутою мезоструктурою. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2007. – № 4. – С.53–65.
8. *Безмянний Ю. Г., Єпіфанцева Т. А., Тесленко Л. О., Козирацький Є. О.* Дослідження впливу структури композита на основі мідного порошку із вольфрамовими краплями на швидкість поширення пружної хвилі // Вісник Націон. технічн. університету "ХПІ". Зб.наук.праць. Тематичний випуск "Електроенергетика та перетворювальна техніка". – Харків: НТУ "ХПІ" – № 12. – 2010. – С.148–155.
9. *Безмянний Ю. Г., Козирацький Є. А., Гетьман О. И., Радченко П. Я.* Исследование процесса формирования структуры псевдосплавов Cu-W ультразвуковым методом. // Тез. докл. І всеукраїнської н.-т. конференції «Актуальні проблеми автоматики та приладобудування» Харків ХПІ, 11-12 грудня 2014 р. – С.18-19.
10. *Безмянний Ю. Г., Козирацький Є. А., Колесников А. Н., Тесленко Л. О.* Сравнение динамических методов при определении упругих характеристик разных материалов. // Вісник націон. технічн. університету «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. Зб. наук. праць. – № 19 (1062) 2014. – С.15–22.
11. *Безмянний Ю. Г., Баглюк Г. А., Євко І. Г., Комаров К. А.* Постадійний контроль розподілу властивостей в об'ємі заготовок з порошкового заліза // Вестник Национального технического университета "ХПИ". Серія "Електроенергетика і перетворювальна техніка". Харків, 2013. С. 89-96.
12. *Безмянний Ю. Г., Богдан Г. А., Колесников А. Н.* Оценка свойств материалов на основе монокарбида вольфрама по результатам акустических измерений // Збірник тез доповідей 11 Міжнар. н.-т.конфер. “Приладобудування 2012: стан і перспективи”, 24–25 квітня – 2012 р., м.Київ, – С. 211–212.
13. *Безмянний Ю. Г., Богдан Г. А., Євко І. Г., Іванюк Н. А., Козирацький Є. А.* Контроль неоднородности свойств порошковых материалов по результатам акустических измерений // Вестник Национального технического университета "ХПИ". Сб. науч. трудов. Темат. вып. "Электроэнергетика и преобразовательная техника", 2011. – № 19. – С.204–211.
14. *Безмянная Е. Ю., Колесников А. Н., Назаренко В. А., Талько О. В.* Использование ультразвука для исследования процессов компактирования и консолидации прессовок // Акустичний симпозиум «Консонанс-2011». Збірник праць. – К.: ІГМ НАНУ, 2011. – С.55–60.
15. *Безмянний Ю. Г., Богдан Г. А., Колесников А. Н., Лаптев А. В., Толочин А. И., Хоменко Е. В.* Использование ультразвука при отработке технологии получения порошкового материала // Акустичний симпозиум «Консонанс-2011». Збірник праць. – К.: ІГМ НАНУ, 2011. – С. 65–70.
16. *Безмянний Ю. Г., Єпіфанцева Т. А., Козирацький Є. А., Тесленко Л. О.* Использование ультразвука при отработке состава и свойств порошковых прессовок // Акустичний симпозиум «Консонанс-2011». Збірник праць. – К.: ІГМ НАНУ, 2011. – С.75–80.
17. *Безмянний Ю. Г., Іванюк Н. А., Колесников А. Н., Хоменко Е. В.* Акустическое отображение физико-механических свойств хроммедного композита // Тез. докл. 3-й Междун. конф. High Mat. Tech., 3–7 октября 2011 г. – Киев, Украина. – С. 441.
18. *Безмянний Ю. Г., Бужанська І. І., Волкогон В. М., Колесников А. М., Аврамчук С. К.* Акустичний неруйнівний контроль композитів на основі фаз високого тиску вуглецю та нітриду бору // Збірник тез доповідей 14 Міжнар. н.-т. конфер. “Приладобудування 2015: стан і перспективи”, 22–23 квітня – 2015 р., Київ, – С. 176–177.