

УДК 539.2: 620.7: 621.763

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

БЕЗЫМЯННЫЙ Ю.Г., канд. техн. наук, ст. науч. сотр., КОЗИРАЦКИЙ Е.А.
Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАНУ, г. Киев, Украина.

В соответствии с различными механическими моделями (Бальшина, Скорохода, Макензи, композиционной, перколяционной) проведено математическое моделирование функциональной зависимости эффективной скорости распространения продольной упругой волны в волокнистом композите от свойств исходных компонентов, пористости, количества межчастичных контактов. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными. Сделаны выводы об эффективности использования каждой модели и их возможностях для прогнозирования и контроля свойств волокнистых композитов.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа представляет собой пример практического применения методологии акустического контроля физико-механических свойств, элементов структуры и дефектности многофазных гетерогенных материалов [1] к композитам на основе металлических волокон.

Материалы из металлических волокон представляют собой один из видов пористых проницаемых материалов, изготавливаемых формованием и спеканием дисперсных волокон. Использование в качестве исходных элементов металлических волокон позволяет формировать уникальные эксплуатационные характеристики таких материалов, что обеспечило им широкое применение во многих отраслях промышленности как фильтров, антифрикционных материалов, теплоотводов, демпферов. [2]

Управление эксплуатационными свойствами волокнистых материалов обеспечивается выбором свойств исходных волокон (материалов, размеров), концентрации фаз, их морфологии, степени связности и других структурных параметров. Поэтому на этапе разработки новых материалов возникает необходимость прогнозировать свойства композита по свойствам исходных компонентов, а при производстве и эксплуатации изделий из таких материалов - контролировать свойства композита. В частности, представляет интерес исследование возможностей отображения свойств волокнистых композитов с помощью скоростей распространения упругих волн и прогнозирование величины этой скорости по известным свойствам исходных компонентов [1]. В настоящей работе такие исследования проводилось для скорости распространения продольной упругой волны путем анализа акустических, структурных, механических и математических моделей.

1 ИСХОДНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В качестве исходной возьмем функциональную связь эффективной скорости распространения продольной упругой волны в композите (V_l) с его эффективными модулем упругости (E), плотностью (ρ) и коэффициентом Пуассона (ν) [3]:

$$V_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)}} \quad (1)$$

В формуле (1) ефективна плотність визначається як скалярна величина по принципу адитивності [4]:

$$\rho = \rho_o(1-\theta), \quad (2)$$

де ρ_o – густина компактного матеріалу, θ – пористість. Нескалярні характеристики (E і ν) потребують більш складних систем усереднення [4].

2 МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОСТІ

Відомо [5-10] ряд моделей, що дозволяють визначити ці характеристики. Сопоставимо їх між собою і з експериментальними даними.

2.1 Композиційна модель

Відповідно до цієї моделі [5] матеріал розглядається як композит, що складається з матриці, армованої довільно орієнтованими в просторі неперервними волокнами. Структурна модель цього матеріалу представлена на рис. 1а.

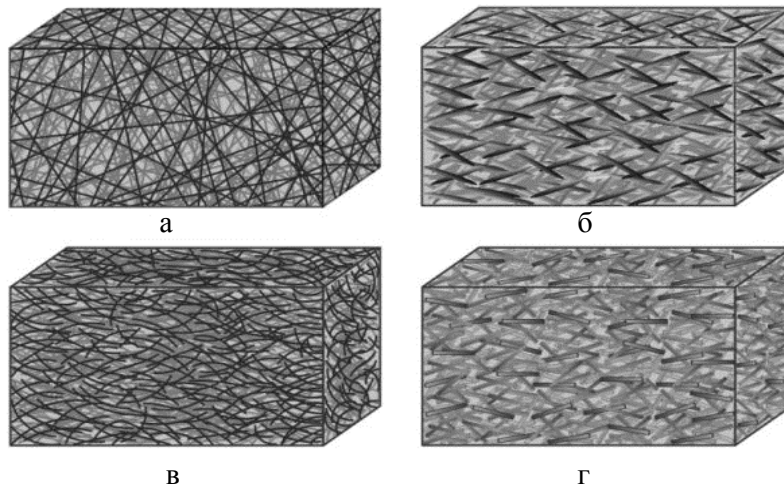


Рис.1.

Для даної моделі ефективний модуль епругості визначається по формулі:

$$E = cE_B + (1-c)E_M + 4c(1-c)G_M \frac{(v_B - v_M)^2}{\frac{(1-c)G_M}{K_B + G_M/3} + \frac{cG_M}{K_M + G_M/3} + 1}$$

де E_M , μ_M , k_M , ν_M – відповідно модулі епругості, сдвига, сжатия і коефіцієнт Пуассона матеріалу матриці, E_B , μ_B , k_B , ν_B – те ж епругості матеріалу волокон, c – відношення об'єму включень до загальному об'єму матеріалу.

Учитывая что в исследуемом волокнистом материале отсутствует матрица, а пространство между волокнами заполнено воздухом, получим выражения для модуля епругості волокнистого матеріалу:

$$E = (1 - \theta)E_o, \quad (3)$$

де E_o – модуль епругості матеріалу волокон.

Ця модель не враховує кількість і якість міжчастичних контактів, вигнутість і розміри частинок, що складають матеріал і тому далеко від реального волокнистого матеріалу.

2.2 Модель Макензи

В соответствии с этой моделью [6] волокнистый материал состоит из частиц в виде вытянутых эллипсоидов. Структурная модель этого материала представлена на рис. 1б. Эффективный модуль упругости для данной модели определяется по формуле:

$$\frac{E}{E_0} = 1 - 15\theta \frac{1 - \nu_0}{7 - 5\nu_0} + P(\theta)^2, \quad (4)$$

где E_0 , ν_0 – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала волокна, P – некоторая константа, определяемая экспериментально (в большинстве случаев имеет пренебрежимо малое значение).

В этой модели предполагается, что коэффициент Пуассона не зависит от пористости ($\nu = \nu_0$).

2.3 Модель Скорохода

В соответствии с этой моделью [7] материал состоит из хаотически ориентированных бесконечных цилиндров со сферическими включениями в местах пересечений цилиндров. Структура такой модели близка к композиционной (рис. 1а), однако, позволяет учесть контактные явления. Эффективный модуль упругости для данной модели определяется по формуле [8]:

$$E = \frac{11,28K_0G_0(1-\theta)^{2,22}}{K_0(4-3\theta) + 1,25G_0(1-\theta)^{1,22}}, \quad (5)$$

где K_0 , G_0 – модули всестороннего сжатия и сдвига материала волокна.

Эта модель не учитывает качество межчастичных контактов, изогнутость и размеры частиц, составляющих материал.

2.4 Модель Бальшина

В отличие от предыдущих, эта модель [9] полуэмпирическая. Для учета количества и качества межчастичных контактов, размеров и изогнутости частиц, составляющих материал, а так же других трудно учитываемых факторов в простую функциональную зависимость вводится экспериментальная константа m , имеющая разные значения для разных материалов. Структура такой модели практически не отличается от реального материала (рис. 1в). В соответствии с этой моделью не только модуль упругости зависит от пористости в соответствии с формулой:

$$E = E_0(1-\theta)^m, \quad (6)$$

но и коэффициент Пуассона также является функцией пористости в соответствии с формулой:

$$\nu = \nu_0 \sqrt{E/E_0} = \nu_0(1-\theta)^{\frac{m}{2}}. \quad (7)$$

Для волокнистого железа можно принять $m=2$.

2.5 Перколяционная модель

В соответствии с этой моделью [10] материал состоит из частиц в виде цилиндров длиной L и диаметром D . Количество межчастичных контактов описывается координационным числом Z . Структурная модель такого материала показана на рис. 1г. Влияние размеров частиц, количества межчастичных контактов и пористости в модели осуществляется с помощью перколяционного индекса:

$$a_y = 2Ma \frac{\left[1 + \frac{(a^{(1-\theta)(L/D-1)} - 1)}{M} \right]}{2M + L/D - 1}, \quad (8)$$

где $M = 3$ – размерность пространства, a зависит от координационного числа Z :

$$a = \frac{1,36}{Z} + 0,08. \quad (9)$$

Для определения модуля упругости используется зависимость:

$$E = E_0 \left[\frac{1 - \theta - 0,524a_y}{1 - 0,524a_y} \right]^{1,8}.$$

При $Z = 6$ получаем:

$$E = E_0 \left[1 - \frac{\theta}{1 - 0,321 \cdot \frac{0,307^{(1-\theta)(L/D-1)} + 2}{5 + L/D}} \right]^{1,8}. \quad (10)$$

В отличие от предыдущих, эта модель позволяет учесть размеры частиц.

2.6 Сравнительный анализ моделей

Экспериментальная и расчетные зависимости модулей упругости волокнистого железа от пористости для рассмотренных моделей приведены на рис. 2: 1 – экспериментальная [8], 2 – композиционная, 3 – Маккензи, 4 – Скорохода, 5 – Бальшина, 6 – перколяционная.

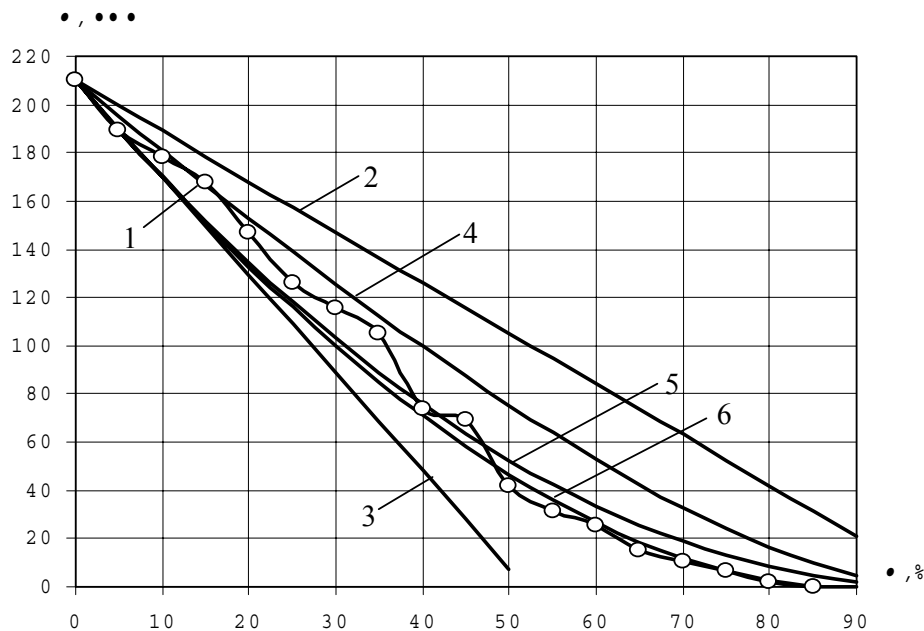


Рис. 2

Как видно из рисунка, экспериментальная кривая хорошо описывается моделью Маккензи при пористостях до 5 %, моделью Скорохода при пористостях до 20 %, перколяционной моделью при пористостях до 10 и выше 40 %, удовлетворительно описывается моделью Бальшина во всем диапазоне пористостей, а композиционная модель дает завышенные значения модуля.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Итак, получены выражения для всех составляющих входящих в формулу (1) для скорости распространения упругих волн. Подставляя в (1) выражения (2) для плотности и (7) для коэффициента Пуассона получаем:

$$V_l = \left[\frac{E(1-\nu_0\sqrt{E/E_0})}{\rho_0(1-\theta)(1+\nu_0\sqrt{E/E_0})(1-2\nu_0\sqrt{E/E_0})} \right]^{0.5} = V_{l0} \left[\frac{E}{E_0} \cdot \frac{(1+\nu_0)(1-\nu_0\sqrt{E/E_0})(1-2\nu_0)}{(1-\theta)(1-\nu_0)(1+\nu_0\sqrt{E/E_0})(1-2\nu_0\sqrt{E/E_0})} \right]^{0.5} \quad (11)$$

где V_{l0} - скорость распространения продольных упругих волн компактного материала.

Подставляя в формулу (11) выражение для E/E_0 из разных моделей, получим зависимости скорости распространения упругих волн в волокнистом композите от характеристик упругости исходных компонентов, размеров элементов структуры, пористости, количества межчастичных контактов.

Экспериментальный [8] и расчетные графики зависимостей $V(\theta)$ для волокнистого нихрома представлены на рис. 3 (номера кривых соответствуют обозначениям на рис.2).

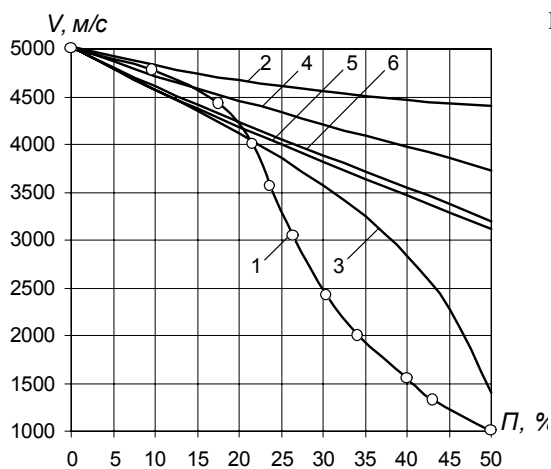


Рис. 3.

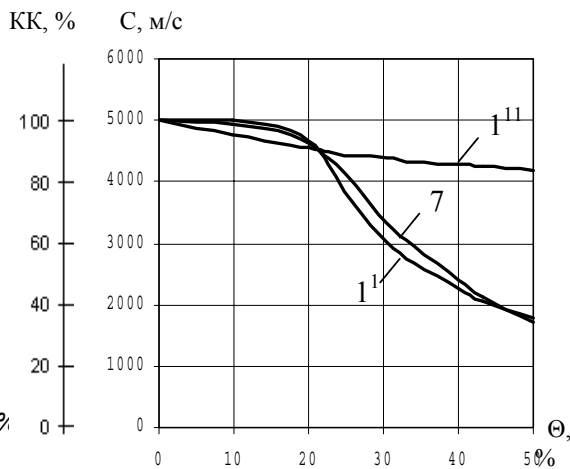


Рис. 4.

Как видно из рисунка, при пористостях выше 20 % экспериментальная кривая существенно расходится с расчетными. Это объясняется тем, что в экспериментальных результатах содержится еще один механизм, влияющий на скорость распространения ультразвука – качество межчастичных контактов. Кривая 7 на рис. 4 характеризует экспериментально полученную [8] зависимость качества контактов от пористости. Если, используя эту зависимость, аддитивно разложить зависимость 1 (рис. 3) на две составляющие, в одной из которых скорость распространения упругой волны зависит только от качества контактов (рис. 4, кривая 1^1), а вторая – только от пористости (рис. 4, кривая 1^{11}), то рассчитанная таким образом зависимость скорости распространения упругих волн от пористости при идеальных контактах (рис. 4, кривая 1^{11}) хорошо

согласуется с аналогичной зависимостью, рассчитанной по модели Скорохода (рис. 3, кривая 4). Полученный результат свидетельствует о том, что скорость распространения упругой волны чувствительна к качеству межчастичных контактов и может быть использована для его контроля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлена функциональная связь скорости распространения упругой волны с характеристиками упругости и размерами исходных волокон, количеством межчастичных контактов и пористостью, на основании которой скорость распространения упругой волны может быть использована для оценки этих характеристик материала и прогнозирования эффективных свойств композита.

Показано, что, при выборе модели волокнистого материала, закладываемую в расчеты контролируемых параметров, следует учитывать диапазон пористостей и характеристику материала, которая подлежит контролю.

Показано, что скорость распространения упругой волны чувствительна к качеству межчастичных контактов и может быть использована для его контроля.

Развитие работ по использованию скорости распространения упругих волн для отображения и контроля физико-механических свойств, элементов структуры и дефектности волокнистых материалов следует считать целесообразным в направлении получения массива экспериментальных данных, позволяющего подтвердить полученные результаты и разработать методы численной оценки свойств волокнистых композитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безмянный Ю.Г. Методология акустического контроля многофазных гетерогенных материалов / Збірник праць акустичного симпозіуму «Консонанс 2005». – К.: 2005 – с.50-55.
2. Пористые проницаемые материалы: Справочник / Под ред. Белова С. В. - М.: Металлургия, 1987. – 335 с.
3. Безмянный Ю.Г. Использование акустических характеристик для контроля структуры пористых материалов / Электронная микроскопия и прочность материалов. Сб. науч. тр. Киев, 1999. – С.93-105.
4. 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.
5. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 334с.
6. Mackenzie J. K. The elastic Constants of Solid Containing Spherical Holes // Proc. Phys. Soc. (B). – 1950. – 63, № 1. – P. 2-11.
7. Скороход В.В. Некоторые физические свойства высокопористых тел // Порошковая металлургия. - 1967. - № 6. – С.33–38.
8. Косторнов А. Г. Проницаемые металлические волокнистые материалы. – К.: Техника, 1983. – 128 с.
9. Бальшин М. Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. – М.: Металлургия, 1972. – 336 с.
10. Крючков Ю. Н. Моделирование пористой структуры и массопереноса в порошковых проницаемых материалах с учетом нелинейных структурных эффектов. – К.: ИПМ им. Францевича, 1995. – 216 с.