

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 ( $\rho$ ) и коэффициентом Пуассона ( $\nu$ ) [3]:

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

В формуле (1) эффективная плотность определяется как скалярная величина по принципу аддитивности [4]:

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

где  $\rho_o$  – плотность компактного материала,  $\theta$  – пористость. Нескалярные характеристики ( $E$  и  $\nu$ ) требуют более сложных систем усреднения [4].

## 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОСТИ

Известен [5-10] ряд моделей, позволяющих определить эти характеристики. Сопоставим их между собой и с экспериментальными данными.

### 2.1 Композиционная модель

В соответствие с этой моделью [5] материал рассматривается как композит, состоящий из матрицы, армированной произвольно ориентированными в пространстве непрерывными волокнами. Структурная модель этого материала представлена на рис. 1а.

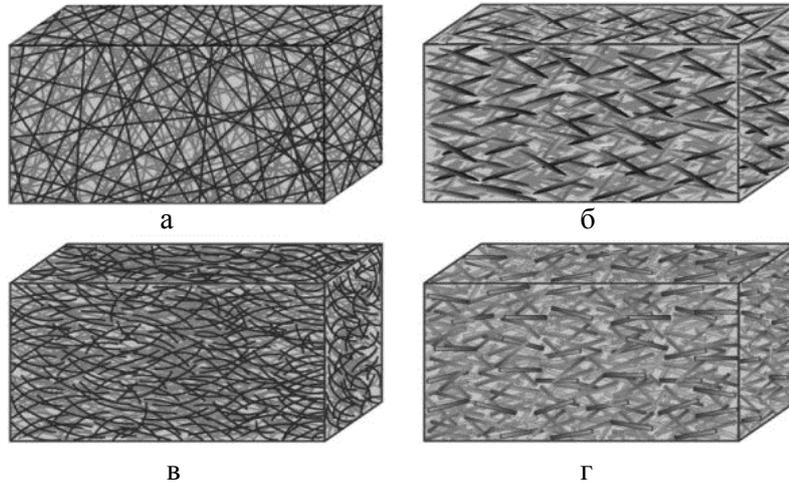


Рис.1.

Для данной модели эффективный модуль упругости определяется по формуле:

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

где  $E_M, \mu_M, k_M, \nu_M$  – соответственно модули упругости, сдвига, сжатия и коэффициент Пуассона материала матрицы,  $E_B, \mu_B, k_B, \nu_B$  – те же упругие характеристики материала волокон,  $c$  – отношение объема включений к общему объему материала.

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

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

где  $E_o$  – модуль упругости материала волокон.

Эта модель не учитывает количество и качество межчастичных контактов, изогнутость и размеры частиц, составляющих материал и поэтому далека от реального волокнистого материала.

## 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  $E_0$ ,  $\nu_0$  – 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.

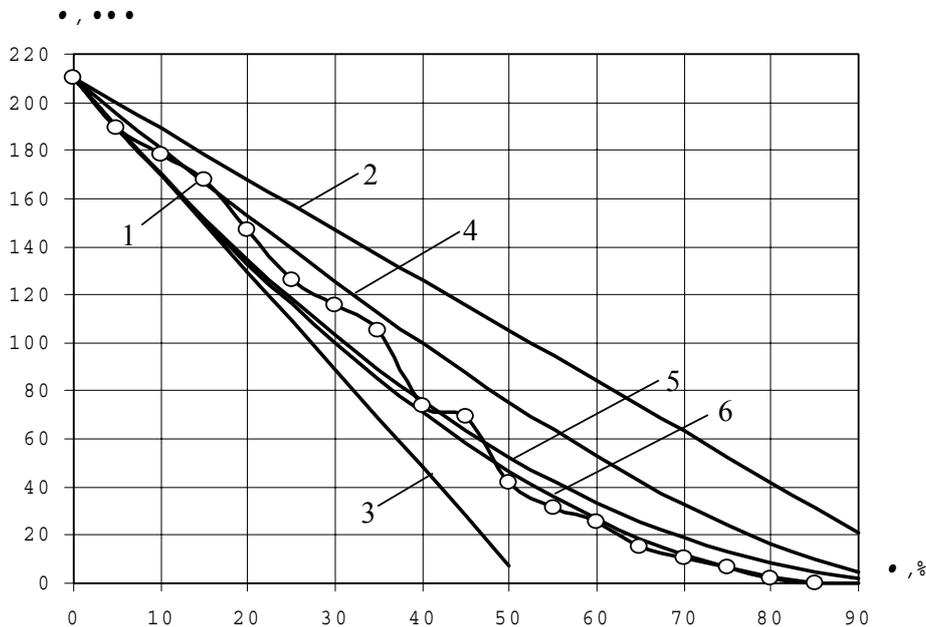


Рис. 2

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).

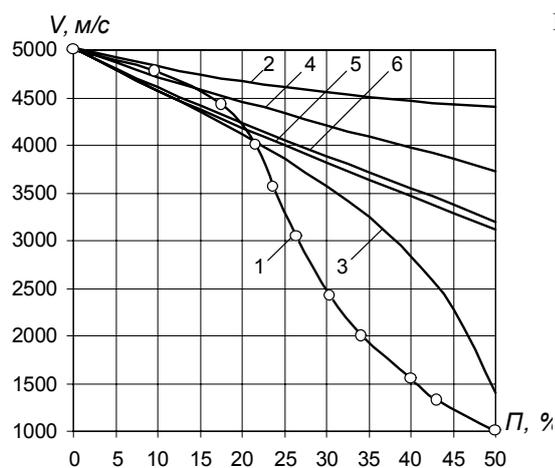


Рис. 3.

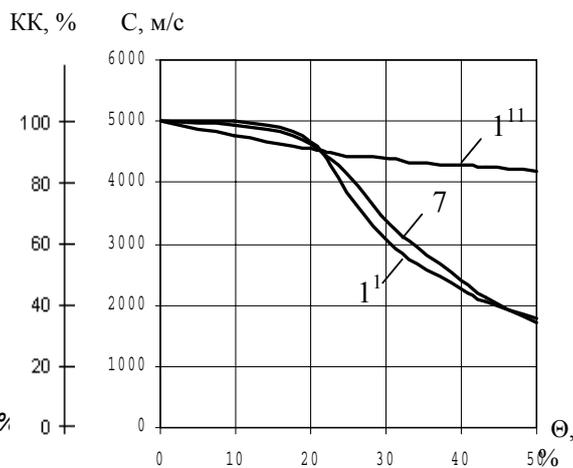


Рис. 4.

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 волокновые 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.