ISSN 1028-7507 Акустичний вісник. 2006. Том 9, N 1. С. 15 – 20

УДК 539.2:620.7:621.763

ОТОБРАЖЕНИЕ СВОЙСТВ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН

Ю. Г. БЕЗЫМЯННЫЙ, Е. А. КОЗИРАЦКИЙ

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

Получено 14.02.2006

В соответствии с различными механическими моделями формирования свойств пористой гетерогенной среды установлены функциональные зависимости эффективной скорости распространения продольной упругой волны в волокнистом композите от свойств исходных компонентов и пористости. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными. Сделаны выводы о возможности использования скорости упругой волны для оценки характеристик упругости и пористости волокнистого материала, размеров волокон, количества межчастичных контактов, контроля их качества, а также для прогнозирования эффективных свойств композита.

Відповідно до різних механічних моделей формування властивостей пористого гетерогенного середовища встановлені функціональні залежності ефективної швидкості поширення поздовжньої пружної хвилі у волокнистому композиті від властивостей вихідних компонентів та пористості. Результати моделювання зіставлені з експериментальними даними. Зроблені висновки про можливість використання швидкості пружної хвилі для оцінювання характеристик пружності й пористості волокнистого матеріалу, розмірів волокон, кількості міжчастинкових контактів, контролю їх якості, а також для прогнозування ефективних властивостей композита.

Functional dependencies of the effective velocity of a longitudinal wave, propagating in a fibrous composite, on the component properties and porosity have been established; that was made on the basis of different mechanical models of forming the properties of the porous medium. The results of modeling are compared with experimental data. The conclusions are made concerning the use of the elastic wave velocity for assessing the elastic and porosity characteristics of the fibrous material, the number of interparticle contacts, their quality control and forecasting the effective properties of the composite.

ВВЕДЕНИЕ

Материалы из металлических волокон представляют собой один из традиционных для порошковой металлургии видов пористых проницаемых материалов [1]. Их изготовляют посредством формования и спекания дисперсных волокон. Особенности исходного материала и технологии производства позволяют формировать уникальные свойства, связанные, в первую очередь, с возможностью создания практически неограниченного диапазона пористости (до 98 %) [2]. Это способствует широкому применению волокнистых материалов во многих отраслях промышленности в качестве фильтров, антифрикционных материалов, теплоотводов, демпферов [3].

Управление свойствами волокнистых материалов обеспечивается выбором физических и геометрических свойств исходных волокон, 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 [4].

В двухтомной монографии [5, 6] приведен скрупулезный обзор изданных за последние десятилетия в странах СНГ работ по материаловедению пористых и дисперсных металлов. Из него видно, что количество публикаций, посвященных акустическим методам исследования и контроля материалов из металлических волокон, незаслуженно мало. В то же время, применительно к материалам порошковой металлургии, ультразвуковой контроль (в частности по скорости распространения упругих волн) не только не уступает, но и имеет ряд преимуществ перед гораздо более часто упоминаемым резистометрическим [7]. Известны и другие работы [8 – 11], подтверждающие перспективность использования скорости ультразвука для контроля конструкций из металлического волокна.

Основные трудности в решении задачи применения акустических методов для исследования поликомпонентных материалов обусловлены структурной чувствительностью регистрируемого физического параметра, т. е. его существенной зависимостью не только от концентрации фаз, но и от их морфологии, взаимного расположения, степени связности и др. Поэтому эффективное использование скорости упругой волны в рассматриваемом

© Ю. Г. Безымянный, Е. А. Козирацкий, 2006

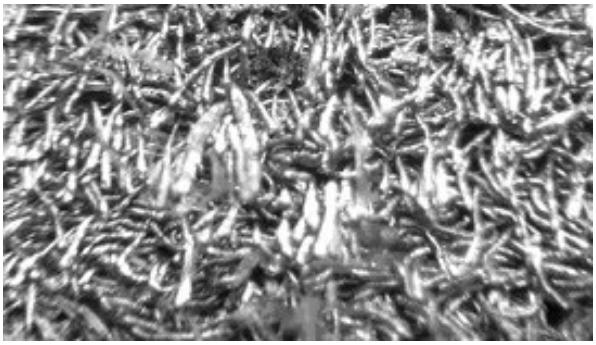

Рис. 1. Реальная структура волокнистого материала

случае требует адекватного учета указанных структурных параметров. Тогда появляется реальная возможность определить их (или их усредненные значения) по измеренным и расчетным значениям скорости упругой волны [4]. Вопрос о такой связи, позволяющей надежно решать практические задачи, пока остается открытым.

В нашем случае интерес представляет исследование возможностей отображения свойств волокнистых композитов с помощью скоростей распространения упругих волн и прогнозирование величины этой скорости по известным свойствам исходных компонентов с возможностью дальнейшего использования полученных зависимостей для разработки методов неразрушающего контроля. В этой статье оно проводилось для скорости распространения продольной упругой волны путем анализа акустических, структурных, механических и математических моделей и сопоставления их с имеющимися экспериментальными данными. Поэтому данную работу можно рассматривать как пример практического применения методологии обоснования акустических методов неразрушающего контроля физико-механических свойств, элементов структуры и дефектности пористых материалов [12] к композитам на основе металлических волокон.

1. АНАЛИЗ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ. ИСХОДНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Характерная структура волокнистого материала схематически показана на рис. 1. Свойства такого материала формируются на мезоуровне следующими основными факторами: свойствами исходных волокон, свойствами порового пространства, свойствами контактов между волокнами.

Будем рассматривать такой материал как эффективно гомогенный континуум, скорость распространения упругой волны в котором равна эффективной скорости распространения волны в исследуемом материале [13]. Это предположение будет справедливым при условии малости волновых размеров структурных элементов мезоуровня. Тогда в качестве исходной можно взять функциональную связь эффективной скорости продольной упругой волны в композите v_l с его эффективными модулем упругости E, плотностью ρ и коэффициентом Пуассона ν [14]:

$$v_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}\,. \qquad (1)$$

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

$$\rho = \rho_0(1-\theta), \qquad (2)$$

где ρ_0 – плотность компактного материла, θ – пористость. Нескалярные характеристики E и ν требуют более сложных систем усреднения [4].

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОСТИ

Известен ряд наиболее широко используемых моделей, позволяющих определить эти характеристики [1, 13, 15–18]. Сопоставим их между собой и сравним с экспериментальными данными.

2.1. Композиционная модель

В соответствии с этой моделью [13] материал рассматривается как композит, состоящий из матрицы, армированной произвольно ориентированными в пространстве непрерывными волокнами. Его структурная модель представлена на рис. 2, *а*.

Для данной модели эффективный модуль упругости определяется по формуле

$$E = cE_{\rm B} + (1-c)E_{\rm M} + 4c(1-c)G_{\rm M}\times$$
$$\times\frac{(\nu_{\rm B}-\nu_{\rm M})^2}{\dfrac{(1-c)G_{\rm M}}{K_{\rm B}+G_{\rm M}/3}+\dfrac{cG_{\rm M}}{K_{\rm M}+G_{\rm M}/3}+1}\,,$$

где $E_{\rm M}$, $G_{\rm M}$, $k_{\rm M}$, $\nu_{\rm M}$ – модули упругости, сдвига, сжатия и коэффициент Пуассона материала матрицы соответственно; $E_{\rm B}$, $G_{\rm B}$, $k_{\rm B}$, $\nu_{\rm B}$ – те же упругие постоянные материала волокон; c – отношение объема включений $V_{\rm B}$ к общему объему материала V,

$$c = \frac{V_{\rm B}}{V} = 1 - \frac{V_{\rm П}}{V} = 1-\theta;$$

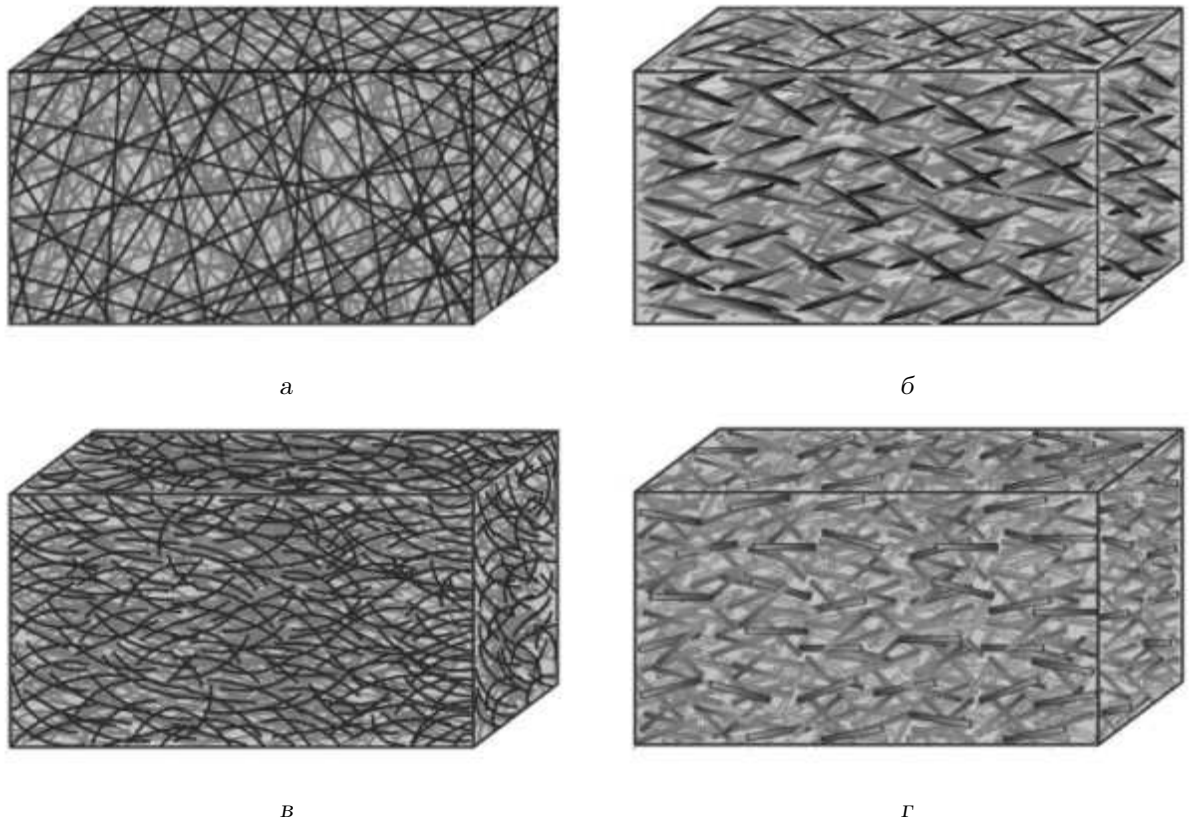

Рис. 2. Структурные модели волокнистого материала:
а – композиционная, б – Маккензи, в – Бальшина, г – перколяционная

$V_{\text{М}}$ – объем, занимаемый матрицей; $V_{\text{П}}$ – объем пор.

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

$$E = (1 - \theta)E_0, \tag{3}$$

где E_0 – модуль упругости материала волокон.

Эта модель не учитывает ряд особенностей реальных волокнистых материалов, например, количество и качество межчастичных контактов, а также изогнутость и размеры волокон, составляющих материал.

2.2. Модель Маккензи

В соответствии с этой моделью [16] волокнистый материал считается состоящим из частиц в виде вытянутых эллипсоидов. Соответствующая структурная модель представлена на рис. 2, *б*. В этом случае эффективный модуль упругости определяется по формуле

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

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

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

2.3. Модель Скорохода

В соответствии с моделью Скорохода [17] материал состоит из хаотически ориентированных бесконечных цилиндров со сферическими включениями в местах их пересечений. Структура такой модели близка к композиционной (см. рис. 2, *а*), однако позволяет учесть количество контактов. Соответствующий эффективный модуль упругости определяется по формуле [15]

$$E = \frac{11.28K_0G_0(1 - \theta)^{2.22}}{K_0(4 - 3\theta) + 1.25G_0(1 - \theta)^{2.22}}, \tag{5}$$

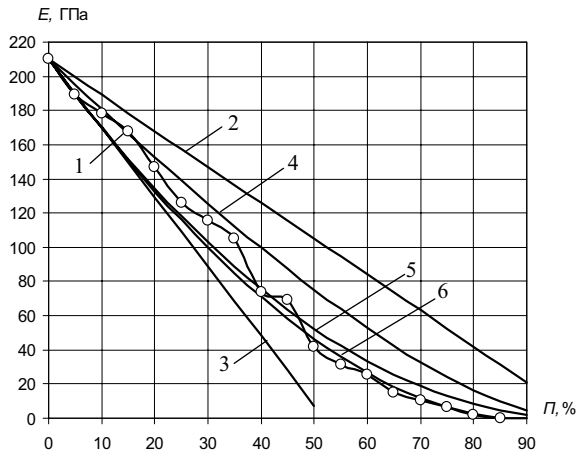

Рис. 3. Зависимости модуля упругости от пористости для волокнистого железа:
1 – эксперимент, *2* – композиционная модель, *3* – модель Маккензи, *4* – модель Скорохода, *5* – модель Бальшина, *6* – перколяционная модель

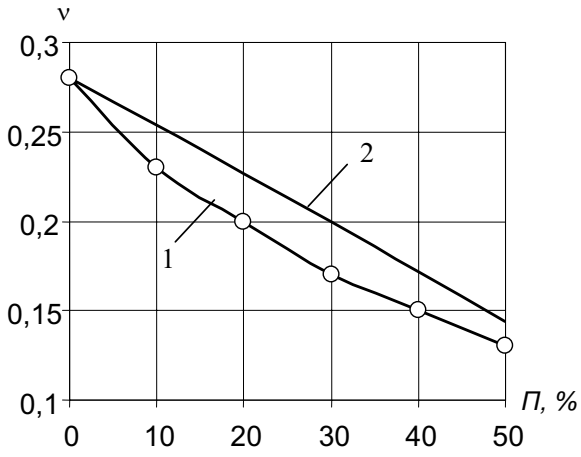

Рис. 4. Зависимости коэффициента Пуассона от пористости:
1 – эксперимент, *2* – согласно формуле (7)

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 является полуэмпирической [1]. Для учета количества и качества межчастичных контактов, размеров и изогнутости частиц, составляющих материал, а также 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. 2, *в*). Здесь зависящим от пористости считается не только модуль упругости

$$E = E_0(1-\theta)^m, \tag{6}$$

но и коэффициент Пуассона

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

2.5. Перколяционная модель

В соответствии с этой моделью [18] 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. 2, *г*. Влияние размеров частиц, количества межчастичных контактов и пористости задается с помощью перколяционного индекса:

$$a_c = 2a\frac{1+(a^{(1-\theta)(L/D-1)}-1)/M}{2M+L/D-1}. \tag{8}$$

Здесь $M=3$ – размерность пространства, а параметр a зависит от координационного числа Z,

$$a = \frac{1.36}{Z} + 0.08. \tag{9}$$

Для определения модуля упругости используется зависимость

$$E = E_0\left[\frac{1-\theta-0.524a_c}{1-0.524a_c}\right]^{1.8}.$$

При $Z=6$ получаем

$$E = E_0\left[1-\frac{\theta}{1-0.321\dfrac{0.307^{(1-\theta)(L/D-1)}+2}{5+L/D}}\right]^{1.8}. \tag{10}$$

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 всех рассмотренных моделей приведены на рис. 3. Здесь и далее на графиках пористость обозначена как П.

Как видно из рисунка, для случая порошкового железа 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 %. Модель Бальшина дает удовлетворительный результат во всем диапазоне пористостей, а композиционная модель завышает значения модуля упругости.

Экспериментальная [20] и рассчитанная по формуле (7) зависимости коэффициента Пуассона волокнистого железа ($m=2$) от пористости приведены на рис. 4. Как видно из графика, тенденция (7) хорошо согласуется с экспериментальной для случая волокнистого железа.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

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

$$v_l = \sqrt{\frac{E}{\rho_0(1-\theta)}} \times$$

$$\times \left[\frac{\left(1-\nu_0\sqrt{\frac{E}{E_0}}\right)}{\left(1+\nu_0\sqrt{\frac{E}{E_0}}\right)\left(1-2\nu_0\sqrt{\frac{E}{E_0}}\right)} \right]^{1/2} =$$

$$= v_{l0}\sqrt{\frac{E}{E_0(1-\theta)}}\sqrt{\frac{(1+\nu_0)(1-2\nu_0)}{(1-\nu_0)}} \times \tag{11}$$

$$\times \left[\frac{\left(1-\nu_0\sqrt{\frac{E}{E_0}}\right)}{\left(1+\nu_0\sqrt{\frac{E}{E_0}}\right)\left(1-2\nu_0\sqrt{\frac{E}{E_0}}\right)} \right]^{1/2}.$$

Здесь v_{l0} – скорость распространения продольных упругих волн компактного материала.

Подставив в формулу (11) выражения для E/E_0 из разных моделей, найдем зависимости скорости распространения упругой волны в волокнистом композите от характеристик упругости исходных компонентов, размеров элементов структуры, пористости и количества межчастичных контактов.

Экспериментальная [15] и расчетные зависимости $v(\Pi)$ для волокнистого нихрома представлены на рис. 5. Как видно из графика, при пористостях выше 20 % опытная 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. 6 характеризует экспериментально полученную зависимость качества контактов от пористости [15]. Используя ее, аддитивно разложим функцию *1* из рис. 5 на две составляющие, в одной из которых скорость распространения упругой волны зависит только от ка-

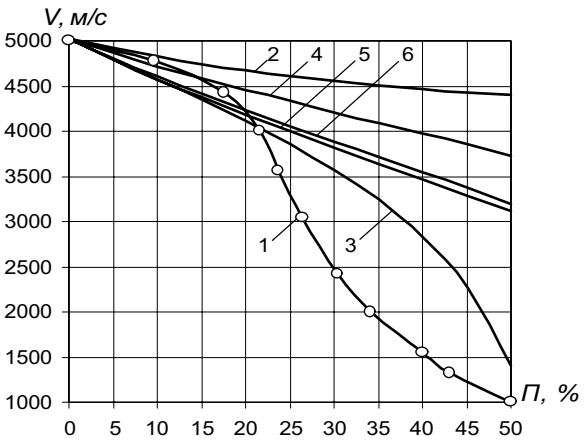

Рис. 5. Зависимость скорости распространения упругих волн в волокнистом нихроме от пористости (номера кривых те же, что и на рис. 3)

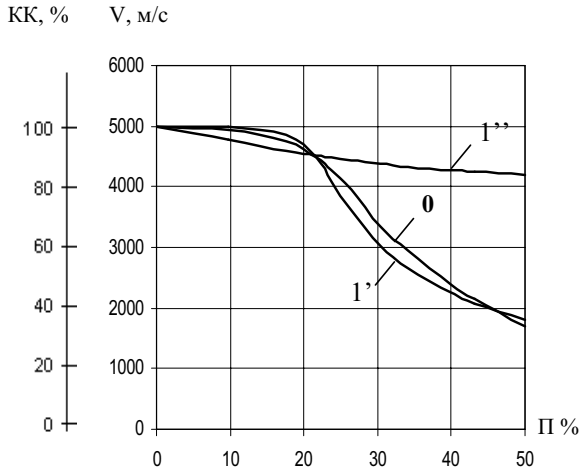

Рис. 6. Зависимости от пористости качества контактов, определенных по элетросопротивлению (*0*) и скорости ультразвука (*1'*), а также скорости ультразвука в материале с идеальными контактами (*1"*)

чества контактов (кривая *1'*), а вторая – только от пористости (кривая *1"*). Полученные таким образом значения скорости распространения упругих волн при идеальных контактах (кривая *1"*) хорошо согласуются с зависимостью, рассчитанной по модели Скорохода (рис. 5, кривая *4*). Это является подтверждением того, что модель Скорохода дает предельное значение модуля упругости, соответствующее идеальным контактам в волокнистом материале [15].

Кроме того, полученный результат свидетельствует о том, что скорость распространения упругой волны чувствительна к качеству межчастичных контактов и может быть использована для его контроля. Эта же особенность обнаружена нами экспериментально для волокнистой меди [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлена функциональная связь скорости распространения упругой волны с характеристиками упругости и размерами исходных волокон, количеством межчастичных контактов и пористостью. Это позволяет использовать скорость распространения упругой волны для оценки указанных характеристик материала и прогнозирования эффективных свойств композита.

Показано, что при выборе модели волокнистого материала, закладываемой 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.

Работы по использованию скорости распространения упругих волн для отображения и контроля физико-механических свойств, элементов структуры и дефектности волокнистых материалов целесообразно развивать в направлении получения массива экспериментальных данных, который позволил бы подтвердить полученные результаты и разработать методы численной оценки свойств волокнистых композитов.

1. *Бальшин М. Ю.* Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна.– М.: Металлургия, 1972.– 336 с.
2. *Косторнов А. Г.* Пористые материалы: научные основы формирования свойств и эффективного применения // Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя.– К.: Наук. думка, 1998.– С. 447–472.
3. *Пористые* проницаемые материалы: Справочник / Под ред. С. В. Белова.– М.: Металлургия, 1987.– 335 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.– С. 53–71.
5. *Косторнов А. Г.* Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов: том 1.– К.: Наук. думка, 2002.– 572 с.
6. *Косторнов А. Г.* Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов: том 2.– К.: Наук. думка, 2003.– 552 с.
7. *Роман О. В., Скороход В. В., Фридман Г. Р.* Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии.– Минск: Вышэйшая школа, 1989.– 182 с.
8. *Rokhlin S. I., Wang L.* Ultrasonic waves in layered anisotropic media: characterization of multidirectional composites // Int. J. Solids Struct.– 2002.– **39**, N 21-22.– P. 5529–5545.
9. *Degrieck J., Declercq N. F., Leroy O.* Ultrasonic polar scans as a possible means of non-destructive testing and characterization of composite plates. Insight // Non-Destruct. Test. Cond. Monit.– 2003.– **45**, N 3.– P. 196–201.
10. *Sato Hirotaka, Shindo Yasuhide.* Multiple scattering of plane elastic waves in a fiber-reinforced composite medium with graded interfacial layers // Int. J. Solids Struct.– 2001.– **38**, N 15.– P. 2549–2571.
11. *Seales M. D., Smith B. T.* Lamb wave assessment of fiber volume fraction in composites // J. Acoust. Soc. Amer.– 1998.– **104**, N 3,- Pt. 1.– P. 1399–1403.
12. *Безымянный Ю. Г.* Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошковая металлургия.– 2001.– N 5-6.– С. 23–33.
13. *Кристенсен Р.* Введение в механику композитов.– М.: Мир, 1982.– 336 с.
14. *Безымянный Ю. Г.* Использование акустических характеристик для контроля структуры пористых материалов // Электронная микроскопия и прочность материалов.– Киев, 1999.– С. 93–105.
15. *Косторнов А. Г.* Проницаемые металлические волокновые материалы.– К.: Техника, 1983.– 128 с.
16. *Mackenzie J. K.* The elastic Constants of Solid Containing Spherical Holes // Proc. Phys. Soc. (B).– 1950.– **63**, N 1.– P. 2–11.
17. *Скороход В. В.* Некоторые физические свойства высокопористых тел // Порошковая металлургия.– 1967.– N 6.– С. 33–38.
18. *Крючков Ю. Н.* Моделирование пористой структуры и массопереноса в порошковых проницаемых материалах с учетом нелинейных структурных эффектов.– К.: ИПМ им. Францевича НАНУ, 1995.– 216 с.
19. *Федорченко И. М., Андриевский Р. А.* Основы порошковой металлургии.– К.: АН УССР, 1963.– 420 с.
20. *Плят Ш. Н., Рапопорт Ю. М., Чофнус Е. Г.* К вопросу о зависимости модуля упругости некоторых гетерогенных систем от пористости // Инж.-физ. ж.– 1958.– **1**, N 6.– С. 96–97.
21. *Косторнов А. Г., Клименко В. Н., Безымянный Ю. Г., Боровик А. Г.* Исследование межчастичных контактов в пористых волокновых материалах из меди на ранних этапах спекания // Порошковая металлургия.– 1999.– N 9-10.– С. 13–17.