

УДК 620.179

**Ю.Г. Безимянний, Є.О. Козирацький, Л.О. Тесленко, О.В. Талько**

### **ЧИННИКИ ВПЛИВУ НА ДИНАМІЧНІ МОДУЛІ ПРУЖНОСТІ ГЕТЕРОФАЗНИХ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Для отримання характеристик пружності нових матеріалів використовують різні експериментальні методи, результати яких залежать від багатьох чинників і можуть суттєво відрізнятися, й особливо у випадку полікомпонентних матеріалів. Для підвищення достовірності визначення динамічних модулів пружності та зменшення розбіжностей між отриманими різними методами значеннями шляхом структурного, акустичного та математичного моделювань, а також аналізу експериментальних даних проведено дослідження особливостей вимірювання модулів пружності у гетерофазних порошкових матеріалах. Як результат, виявлено та систематизовано чинники впливу на отримані акустичними методами модулі пружності цих матеріалів. Виявлені чинники рекомендовано враховувати при постановці акустичного експерименту та зіставленні отриманих у різних експериментах модулів пружності.*

*Ключові слова: модулі пружності, гетерофазні матеріали, акустичні методи, моделювання, експериментальні дослідження.*

#### **Вступ**

Характеристики пружності – фундаментальні механічні властивості матеріалів [1], проте для традиційних їх можна знайти у довіднику, а для нових необхідно вимірювати. Методами порошкової металургії отримують сучасні (у т.ч. гетерофазні) матеріали з бажаними властивостями [2]. Кожен має характерні особливості вихідних компонентів, структури, дефектності, технології виготовлення та експлуатації, які впливають на його фізико-механічні властивості [3]. Класифікація гетерофазних систем із поглядом мікроструктури й структурної чутливості цих їх властивостей (у т.ч. пружності) і основні методи прогнозування див. у роботі [4].

Водночас, математичне прогнозування за властивостями вихідних компонентів і технології уможливує лише (через складність урахування істотних чинників впливу) оцінювання характеристик пружності багатофазних порошкових матеріалів (ПМ). Отже, тільки експериментальні методи дають можливість отримати реальні характеристики пружності нових матеріалів. Слід також відзначити, що, навіть для одного й того самого литого квазіізотропного полікристалічного матеріалу отримані як різними методами, так і одним методом на різних зразках експериментальні значення модулів пружності мають широкий (як жоден інший фізичний параметр матеріалу) діапазон [5], причому у випадку двофазних ПМ ця широта зростає [6], а для гетерофазних ПМ можна припустити, що вона буде ще більшою.

При неруйнівному визначенні модулів пружності застосовують динамічні методи [7], в основу яких покладено відомі [8] співвідношення між швидкостями розповсюдження пружних хвиль та характеристиками пружності

---

© Безимянний Юрій Георгійович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу Інституту проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України (ІПМ); роб. тел. (044) 424-20-55; e-mail: bezimyni@i.com.ua; Козирацький Євген Олександрович, молодший науковий співробітник ІПМ; моб. тел. (067) 378-28-61; e-mail: evgeniy\_k@ukr.net; Тесленко Людмила Олегівна, науковий співробітник ІПМ; роб. тел. (044) 424-20-55; Талько Оксана Вікторівна, молодший науковий співробітник ІПМ; роб. тел. (044) 424-20-5503142, 03680, м. Київ, вул. Кржижановського, 3

твердого тіла. Разом з тим, доцільно встановити чинники впливу на експериментально отримувані модулі пружності гетерофазних ПМ (із метою врахування цих чинників для гарантування достовірності результатів вимірювань). У цьому й полягає мета цієї роботи, для досягнення якої нами використано методологію обґрунтованого синтезу оптимізованих (відповідно до потреби у розв'язанні поставленого завдання) акустичних методів прогнозування й контролю властивостей, структури або дефектності полікомпонентних матеріалів [9]. У контексті ж вирішення проблеми визначення чинників впливу на динамічні модулі пружності гетерофазних ПМ відповідно до вищезгаданої методології необхідно було провести аналіз особливостей вимірювання таких модулів у цих ПМ шляхом структурного, акустичного та математичного моделювань, а також проаналізувати одержані експериментальні дані.

### Моделювання процесу вимірювання модулів пружності у гетерофазних ПМ

Приклади структур отриманих методами порошкової металургії гетерофазних матеріалів наведено на рис. 1.

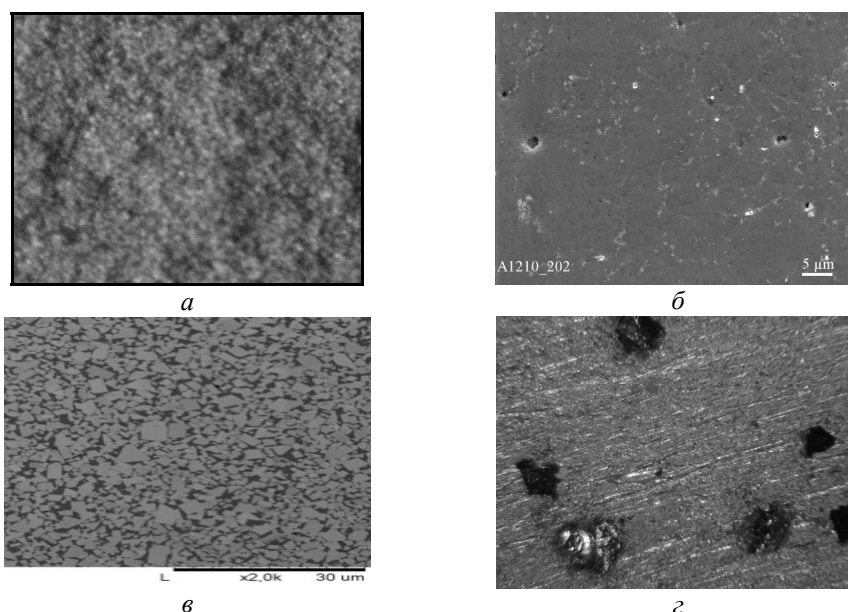


Рис. 1. Мікроструктури гетерофазних композитів на основі: мідного порошку з великим (а,  $\times 10$ ) та малим (б) вмістом вольфрамових вкраплень; монокарбиду вольфраму та кобальту (в); металевої матриці та алмазних вкраплень (г,  $\times 10$ )

Відповідно до роботи [4] та як бачимо на зображеннях мікроструктур, вихідні компоненти (порошки) гетерофазних матеріалів можуть суттєво відрізнятися між собою (розмірами, формою, фізико-механічними властивостями), а їх концентрації у матеріалі можуть варіюватися у широких межах. При цьому для готового матеріалу, як правило, характерна наявність різних видів структур, пор, макродефектів і недосконалих контактів, а його властивості можуть бути анізотропними.

Спрощену структурну модель гетеро фазного ПМ, який має два вихідні компоненти, представлено на рис. 2.

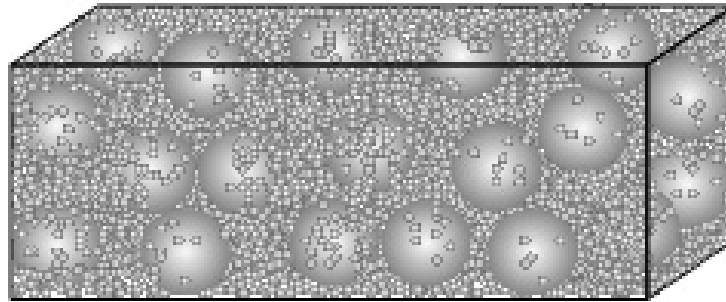


Рис. 2. Структурна модель гетерофазного ПМ

Сфери на рис. 2 відображають ефективний об'єм, який займають частинки фаз. Для цієї моделі можна виділити основні чинники, які характеризують матеріал: розміри, форму (може суттєво відрізнятися від сферичної); відносна частка компонентів і наявність пор та макродефектів, які домішуються на вищенаведеному рисунку. Пори, які майже завжди наявні у ПМ, є третьою фазою. Крім того, у матеріалі через недосконалість технологічного процесу можуть з'являтися домішки, а як його результат утворюватися нові фази.

Для цієї структурної моделі, відповідно до рекомендацій, які містить робота [9], побудовано акустичне відображення (рис. 3).

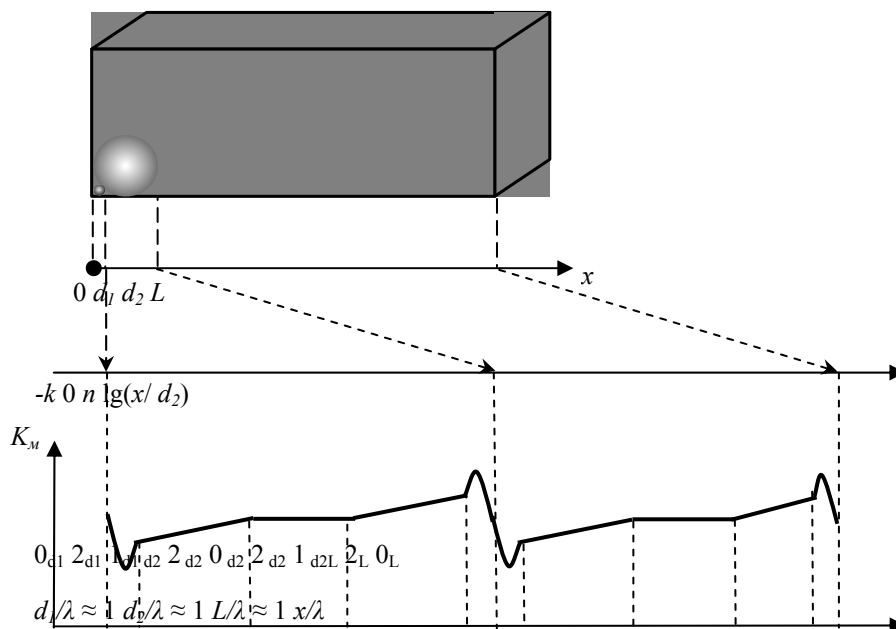


Рис. 3. Акустична модель двофазного ПМ

В акустичній моделі важливими є хвильові розміри елементів досліджуваного зразка матеріалу, а саме його характерний розмір  $L$  та

характерні розміри елементів структури  $d_i$  (тут  $i = 1,2$ , проте, як правило, береться значення кількості компонентів). Числа  $n$  та  $k$  відображають співвідношення між цими розмірами;  $x/\lambda$  – хвильові розміри, де  $\lambda$  – довжина акустичної хвилі; коефіцієнт  $K_m$  – фізична сутність акустичного відображення матеріалу. При акустичному дослідженні зразка бачимо, що, відповідно до хвильових розмірів його елементів, існують зони, де параметри пружної хвилі найбільш чутливі до певної характеристики матеріалу. Для нашого ж завдання з визначення модулів пружності підходять зони коефіцієнту  $K_m$  [7]:  $0_L$ ,  $2_L$ ,  $1_{d2L}$  та  $2_{d2}$  (у кожній із таких зон вимірювання цих модулів необхідно проводити за різними моделями експерименту). Так, у зоні  $0_L$  можливе використання тільки резонансного ультразвукового методу, зона  $1_{d2L}$  найбільше підходить для імпульсного ультразвукового методу (ІУМ), а в зонах  $2_L$  та  $2_{d2}$  можливе використання ІУМ, але з певними обмеженнями. Вибір зони дослідження матеріалу зумовлений, відповідно до виразу  $x \cdot f / c_i$  (де  $x = d_i \cdot L$ ), як розмірами зразка матеріалу ( $L$ ) і його структурних компонентів ( $d_i$ ), так і фізико-механічними властивостями компонентів  $c_i$  та частотою  $f$ , на якій вимірюють модулі пружності. Оскільки ж якщо акустичний експеримент з вимірювання цих модулів поставлений некоректно, то не можна буде отримати достовірні результати, надалі вважатимемо, що експеримент поставлений коректно. І також слід зазначити, що зі збільшенням частоти зростає вплив елементів структури на параметри акустичних полів, а це для гетерофазних систем може слугувати причиною розбіжностей між отриманими резонансним та імпульсним методами вимірювання експериментальними даними.

Математична модель, яку закладають в основу експерименту з вимірювання модулів пружності для гетерофазного середовища, суттєво залежить від гіпотези, яку ми приймаємо як робочу стосовно властивостей матеріалу. Розглядаємо запропоновану в роботі [4] найпростішу гіпотезу, а саме що матеріал статистично однорідний та квазіізотропний. Приймаємо також, що коефіцієнт згасання пружної хвилі дуже малий. Вищенаведені припущення відповідають параметрам більшості спечених порошкових матеріалів, тоді як складніша модель експерименту не лише не змінить (принципово) результати дослідження чинників впливу, а ще й призведе до потреби у ще більш громіздкому аналізі.

Для такої моделі залежність між ефективними характеристиками пружності (модулем Юнга  $E$ , модулем зсуву  $G$  та коефіцієнтом Пуассона  $\nu$ ) матеріалу та вимірюваними в результаті експерименту швидкостями поширення пружних хвиль (поздовжньої  $c_l$ , поперечної  $c_t$  та стрижневої  $c_{cm}$ ) можна записати у вигляді:

$$c_{l_{вим}} = \sqrt{\frac{E_e(1-\nu_e)}{\rho_e(1+\nu_e)(1-2\nu_e)}}, c_{t_{вим}} = \sqrt{\frac{E_e}{\rho_e(1+\nu_e)}} = \sqrt{\frac{G_e}{\rho_e}}, c_{cm_{вим}} = \sqrt{\frac{E_e}{\rho_e}}.$$

Аналіз цих функцій показує, що параметри акустичного сигналу залежать від ефективних значень модулів пружності та щільності матеріалу, а це вказує на те, що чинниками впливу на вимірювальні параметри акустичного поля є: властивості вихідних параметрів; особливості технології виготовлення матеріалу; особливості самого матеріалу після його виготовлення [3, 4, 7].

### Результати експериментальних досліджень

Для підтвердження чинників впливу на динамічні модулі пружності гетерофазних ПМ, які отримують в результаті акустичного експерименту,

проведено аналіз відомих експериментальних даних. Його результати наведено у табл. 1 ( $K$  – модуль всебічного зсуву,  $c_{ij}$  – пружні константи).

Аналіз наведених у цій таблиці результатів показує, що завдання з визначення модулів пружності багатофазних ПМ набагато складніша порівняно з двофазними ПМ через більшу кількість комбінацій характеристик вихідних матеріалів та технологічних операцій, які відображають залежність дисперсійного характеру між параметрами акустичного поля та характеристиками пружності матеріалу і через те впливають на результати визначення цих характеристик акустичними методами. Це питання на сьогодні залишається недостатньо дослідженим. У цілому вирішення окреслених вище завдань потребує використання складніших моделей як розрахунку, так і експериментальних досліджень, а також застосування статистичних методів обробки даних.

Таблиця 1

## Аналіз експериментальних досліджень

Клас чинників	Чинник впливу	Дослідження		
		Характеристики пружності	Посилання	
1	Вихідні компоненти	Розмір частинок	E, G	10, 14
		Форма частинок	E, G, K	11, 12, 16, 28, 30, 31
		Фізичні властивості частинок	E, K	16, 18, 24, 28
		Об'ємна частка компонентів	E, G, K, $\nu$	10, 13–18, 28
2	Особливості матеріалу	Пористість	E, G, $\nu$	11, 15, 16, 19, 21, 24, 26, 28, 29
		Анізотропія	E, $c_{ij}$	16, 19, 22, 23, 25, 30
		Морфологія	$c_{ij}$	16, 25, 26
		Дефектність	E	23, 24
		Неоднорідність	E	24
3	Технологія виготовлення	Підготовка суміші	E, G	11, 16
		Тиск пресування	E, G, $c_{ij}$	16, 18, 19, 22, 24, 25
		Температура та вид спікання	E, G,	20, 16, 21, 29
		Хімічна взаємодія частинок	E, G	31
4	Метод вимірювань	Статичний чи динамічний	E, G	27

## Висновки

Задля підвищення достовірності визначення динамічних модулів пружності та зменшення розбігу між отриманими різними методами значеннями шляхом структурного, акустичного та математичного моделювань, а також аналізу експериментальних даних проведено дослідження особливостей вимірювання модулів пружності у гетерофазних ПМ. Як результат, виявлено та систематизовано чинники впливу на отримані акустичними методами відповідні модулі цих матеріалів. Виявлені чинники

рекомендовано враховувати при постановці акустичного експерименту та зіставленні експериментально отриманих таких модулів.

Розвиток досліджень за вищенаведеним напрямом полягає у розробці вимог до акустичних методів визначення характеристик пружності гетерофазних ПМ задля підвищення достовірності результатів вимірювань та зменшення розбіжностей між різними експериментальними методами.

*Для получения характеристик упругости новых материалов используют разные экспериментальные методы, результаты которых зависят от многих факторов и могут существенно отличаться, и особенно в случае поликомпонентных материалов. Для повышения достоверности определения динамических модулей упругости и уменьшения расхождений между полученными разными методами значениями путем структурного, акустического и математического моделирования, а также анализа экспериментальных данных проведено исследование особенностей измерения модулей упругости в гетерофазных порошковых материалах. В результате выявлены и систематизированы факторы влияния на получаемые акустическими методами модули упругости этих материалов. Выявленные факторы рекомендовано учитывать при постановке акустического эксперимента и сопоставлении полученных в разных экспериментах модулей упругости.*

*Ключевые слова: модули упругости, гетерофазные материалы, акустические методы, моделирование, экспериментальные исследования.*

*The different experimental methods, results of which depend on many factors and may essentially differ, particularly in the case of multicomponent materials, are used for test of elasticity characteristics for new materials. To improve the reliability of dynamic elastic modulus measurement and to reduce the differences in the values obtained by different methods of structural, acoustic and mathematical modeling, as well as analysis of experimental data the research of features in measuring heterophase powder materials have been carried out. As a result, the factors of influence on elastic modulus of these materials received by acoustic methods were revealed and systematized. The factors revealed were recommended to take into account at arrangement of acoustic experiment and comparison of elastic modulus received in different experiments.*

*Keywords: elastic modulus, heterophase materials, acoustic methods, modeling, experimental researches.*

1. *Физические величины: справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.*
2. *Степанчук А. Н. Порошковая металлургия // Неорганическое материаловедение: энциклопед. изд. (в 2 тт.) / под ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода. – Т. 2: Материалы и технологии. – Кн. 2. – К.: Наук. думка, 2008. – С. 104–114.*
3. *Роман О. В. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии / О. В. Роман, В. В. Скороход, Г. Р. Фридман. – Мн.: Высш. шк., 1989. – 182 с.*
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. *Францевич И. Н. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов: справочник / И. Н. Францевич, Ф. Ф. Воронов, С. А. Бакута. – К.: Наук. думка, 1982. – 285 с.*
6. *Безьянный Ю. Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошковая металлургия. – 2001. – № 5-6. – С. 23–33.*

7. Ермолов И. Н. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге // Неразрушающий контроль: справочник в 7 тт. под общ. ред. В. В. Клюева. – Т. 3. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
8. Шутлов В. А. Основы физики ультразвука. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1980. – 280 с.
9. Безмянный Ю. Г. Акустичний контроль матеріалів з розвинутою мезоструктурою // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2007. – № 4. – С. 53–65.
10. Gudlur P. Thermal and Mechanical Properties of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites at Elevated Temperatures / P. Gudlur, A. Forness, J. Lentz // Material Science and Engineering: A. – 2012. – Vol. 531, No 1. – P. 18–27.
11. Round R. Evaluation of Reaction Kinetics and Material Properties of Cementitious Ceramic Materials Using Ultrasonic Velocity and Attenuation Measurements: a thesis submitted for the degree of doctor of philosophy. – Brunel University: Department of Physics, June 1996. – 277 p.
12. Tong W. Effective Elastic Moduli and Characterization of a Particulate Metal–Matrix Composite with Damaged Particles / W. Tong, G. Ravichandran // Composites Science and Technology. – 1994. – Vol. 52, Iss. 2. – P. 247–252.
13. Ботаки А. А. Модули упругости и акустические свойства металлокерамики на основе монокарбида вольфрама / А. А. Ботаки, Э. В. Поздеева // Известия Томского политех. института. – 2007. – Т. 311, № 2. – С. 25–35.
14. Vdovichenko O. V. Effect of Microstructure on Young's Modulus of Extruded Al–SiC Composites Studied by Resonant Ultrasound Spectroscopy / O. V. Vdovichenko, V. S. Voropauev, A. N. Slipenyuk // J. Mater. Sci. – 2006. – Vol. 41, No 24. – P. 8329–8338.
15. Акимов В. В. Применение ультразвукового резонансного метода для определения упругих и пластических характеристик сплавов TiC–TiNi / В. В. Акимов, Н. А. Иванов // Прикладная механика и техническая физика. – 2002. – Т. 43, № 2. – С. 203–207.
16. Безмянный Ю. Г. Дослідження взаємозв'язку модуля пружності композиту алмаз + SiC з його структурним станом / Ю. Г. Безмянный, В. Г. Боровик, А. В. Степаненко // Доповіді НАН України. – 2003. – № 2. – С. 90–93.
17. Gnanasundarajayaja B. Characterization, Testing and Software Analysis of Al–WC Nanocomposites / B. Gnanasundarajayaja, N. Selvakumar, R. Muruges // Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 38, No M1. – P. 105–117.
18. Hrairi M. A. Compaction of Fly Ash–Aluminum Alloy Composites and Evaluation of Their Mechanical and Acoustic Properties / M. A. Hrairi, I. N. Mirghani // Advance Powder Technology. – 2009. – Vol. 20, No 6. – P. 548–553.
19. Peter M. L. Compaction Behaviour and Mechanical Properties of Uniaxially Pressed Bi–W Composites / M. L. Peter, A. M. Hodge, G. H. Campbell [Ел. реєстр. Режим доступу: Publication Info. Postprints, Multi-Campus, DOI: 10.10007/s11661-009-9935-9.Sarpun].
20. Sarpun I. H. Determination of Relation between Elastic Constant and Sintered Temperature in WC–Ni Composites / I. H. Sarpun, S. Tungal, V. Ozkan // 17<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing (China, 25–28 Oct. 2008). – Shanghai, 2008. – P. 200–205.
21. Вдовиченко А. В. Эволюция динамического модуля Юнга и демпфирующей способности пористого железа / А. В. Вдовиченко, Ю. Н. Подрезов // Металлофизика и новейшие технологии. – 2005. – Т. 27, № 11. – С. 1429–1440.
22. Безмянный Ю. Г. Исследование анизотропии свойств пористого железа / Ю. Г. Безмянный, В. В. Скороход, О. В. Талько, Г. Р. Фридман // Порошковая металлургия. – 2006. – №3–4. – С. 88–96.
23. Jeong H. Ultrasonic Characterization of Elastic Constants and Defects in Composite Materials: the dissertation // Digital Repository @ Iowa State University: Retrospective Theses and Dissertations (Paper 9510). – Iowa State University, 1990. – 136 p.
24. Егоров М. С. Ультразвуковая диагностика спеченных горячедеформированных порошковых деталей // Концепт. – 2014. – Вып. 2: Современные научные исследования. – Art. 54994 (ISSN 2304-120X) [Ел. реєстр. Режим доступу: URL: <http://e-concept.ru/2014/54994.htm>].
25. Roy S. Analysis of Elastic Properties of an Interpenetrating AlSi<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Using Ultrasound Phase Spectroscopy / S. Roy, O. Stoll, K. A. Weidenmann // Composite Science and Technology. – 2011. – Vol. 71, No 7. – P. 962–968.

26. *Boccaccini D. N.* Dependence of Ultrasonic Velocity on Porosity and Pore Shape in Sintered Materials / D. N. Boccaccini, A. R. Boccaccini // *J. Nondestr. Eval.* – 1997. – Vol. 16, No 4. – P. 187–192.
27. *Bourkas G.* Estimation of Elastic Moduli of Particulate Composites by New Models and Comparison with Moduli Measured by Tension, Dynamic, and Ultrasonic Tests / G. Bourkas, I. Prassianakis, V. Kytopoulos // *Advances in Materials Science and Engineering.* – 2010. – Art. ID 891824. – 13 p.
28. *Lewandowski J.* Determination of Dynamic Properties of Sintered Copper Powder from Ultrasonic Measurements // *Archives of Acoustics.* – 1994. – Vol. 19, No 4. – P. 513–522.
29. *Martin L. P.* Evaluation of Ultrasonically Determined Elasticity–Porosity Relations in Zinc Oxide / L. P. Martin, D. Dadon, M. Posen // *J. Am. Ceram. Soc.* – 1997. – Vol. 80, Iss. 4. – P. 829–846.
30. *Grelsson B.* Elastic Constants of Particle and Fiber Reinforced Metal–Matrix Composites / B. Grelsson, K. Salama // *Research in Nondestr. Eval.* – 1990. – Vol. 2, No 2. – P. 120–134.
31. *Karpur P.* Ultrasonic Characterization of the Fiber Reinforced Metal–Matrix and Ceramic–Matrix Composites / P. Karpur, T. E. Matikas, S. Krishnamurthy // *Composites Eng.* – 1995. – Vol. 5, Iss. 6. – P. 697–711.