

**Ю. Г. БЕЗИМЯННИЙ**, д-р техн. наук, зав.від.,  
ІПМ НАН України, Київ;  
**І. Г. ЄВКО**, пошукач, асист., НТУ України «КПІ»,  
Київ;  
**К. А. КОМАРОВ**, наук.співр., ІПМ НАН України, Київ;  
**О. В. ТАЛЬКО**, мол.наук.співр., ІПМ НАН України, Київ

## **МЕТОДИКА ОЦІНКИ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОШИРЕННЯ ПРУЖНОЇ ХВИЛІ ПРИ ПОЕТАПНОМУ КОНТРОЛІ ЗРАЗКІВ З ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

В статті розроблена методика та оцінені похибки при вимірюванні швидкості поширення пружної хвилі імпульсним методом на різних етапах формування порошкового матеріалу. Особливості вимірювань пов'язані зі зміною форми зразків на кожному етапі їх формування при відсутності плоскопаралельних поверхонь. Наведено результати вимірювання та оцінка похибки у реальних зразках. Показано, що зміна інформативних значень швидкості поширення пружної хвилі суттєво перевищує похибку їх вимірювань.

**Ключові слова:** похибка вимірювань, швидкість поширення пружної хвилі, ультразвуковий імпульсний метод, порошковий матеріал.

**Вступ.** Матеріали на основі порошкового заліза перспективні для використання в деталях і конструкціях з метою здешевлення загальної вартості виробу. Швидкість поширення пружної хвилі (ШППХ) є однією з фізико-механічних характеристик матеріалу, за якою можна контролювати якість зразка або деталі неруйнуючи їх. Наприклад, за ШППХ можна оцінити розподіл властивостей в об'ємі зразка і його зміни після кожного етапу технологічного процесу [1]. Найбільш придатним для цього є ультразвуковий імпульсний метод наскрізного прозвучування зразків з порошкових матеріалів, який дозволяє досліджувати їх пористість; ступінь консолідації, неоднорідність та інше [2].

**Аналіз стану досліджень та літератури.** Ультразвуковий імпульсний метод визначення ШППХ використовують для експериментального дослідження властивостей матеріалів, у тому числі порошкових, ще з кінця минулого сторіччя [1, 3]. Нами було запропоновано удосконалений варіант цього методу [4], призначений для дослідження розподілу властивостей у зразках з порошкових матеріалів, отриманих при використанні сучасних технологій їх виготовлення на різних стадіях фо-

рмування матеріалу за умов зміни форми його зразків та відсутності традиційних для ультразвукових вимірів плоскопаралельних поверхонь. Використання у цьому варіанті методу буферних стрижнів й трансформацій пружної хвилі підвищує похибку вимірювань та потребує для її оцінки використання врахування усіх можливих складових. Відомі методи оцінки сумарної похибки за бюджетом похибок [5, 6, 7]. В [7] показаний приклад складання діаграми Ісікави Каору. В [6] розглядається загальна методика складання бюджету похибок для ультразвукового прозвучування. Відмінності між непевністю і похибкою результатів вимірювання викладені в [5].

**Мета роботи.** Метою роботи є розробка методики оцінювання похибки вимірювань ШППХ зразків з порошкового заліза, які мають складну форму та перевірка розробленої методики на реальних вимірах.

**Постановка проблеми.** У зв'язку з цим доцільно оцінити, наскільки отримані при вимірюваннях ШППХ результати дійсно відображають розподіл властивостей за об'ємом матеріалу. Для цього необхідно визначити похибку вимірювань та порівняти її з результатами оцінки зміни ШППХ.

**Матеріали досліджень.** Для визначення ШППХ у досліджуваних зразках було використано розроблену в Інституті проблем матеріалознавства НАНУ спеціалізовану установку.

Об'єктом контролю вибрані зразки порошкового заліза, які мали форму наведену на рисунку 1, а після першого технологічного впливу на пористу заготовку з висотою  $h_1 = 16$  мм,  $h_2 = 20$  мм, відповідно, діаметр – 30 мм. Потім на ці зразки був здійснений другий технологічний вплив. Після нього зразки (див. рис. 1, б) мали наступні розміри висоту  $h_1 = 14$  мм,  $h_2 = 18$  мм, діаметр – 30 мм.

Схема і особливості прозвучування детально описана в [4, 9].

**Оцінювання похибки.** ШППХ визначається на основі опосередкованих вимірювань [3] за формулою (1):

$$\tilde{n} = \frac{h}{t - t_0}, \quad (1)$$

де  $h$  – висота зразка;  $t$  – час поширення пружної хвилі (ПХ) у зразку;  $t_0$  – сумарний час поширення ПХ в п'єзоелектричних перетворювачах (ПЕП) –  $t_{\text{ПЕП}}$  і в буферних стрижнях (БС) –  $t_{\text{БС}}$ ;  $t_0 = t_{\text{ПЕП}} + t_{\text{БС}}$ .

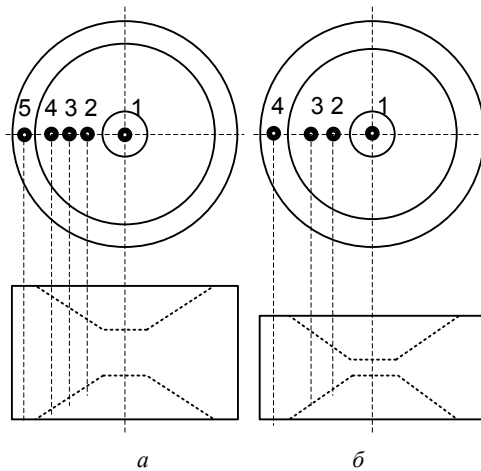


Рис. 1 – Вигляд зразків: *a* – після першого технологічного впливу;  
*б* – після другого технологічного впливу;  
цифри 1, 2, 3, 4, 5 позначені напрями прозвучування

Концепція визначення похибок передбачає оцінку сумарної похибки за бюджетом похибок [6,7], який складається на основі аналізу діаграми Ісікави Каору[5]. Така діаграма для вимірювання ШППХ імпульсним акустичним методом наведена на рис.2.

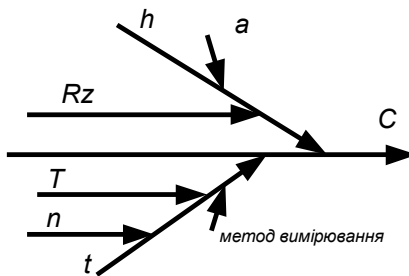


Рис. 2 – Діаграма Ісікави Каору для складання бюджету похибок при вимірюваннях ШППХ

У табл.1 наведено пояснення та тип оцінювання похибок величин представлених на рис.2.

Згідно з діаграмою Ісікави Каору, побудуємо бюджет похибок. При складанні бюджету похибок передбачалось, що випадкові складові сукупності похибок є некорельованими.

Таблиця 1 – Бюджет складових похибок

Позначення	Величина	Тип оцінювання величини
<b>C</b>	Швидкість проходження пружної хвилі в зразку	Розрахункова
<b>H</b>	Висота зразка	Вимірювана (тип А)
<b>R<sub>z</sub></b>	Шорсткість поверхні зразка	Розрахункова
<b>A</b>	Плоскопаралельність зразка	Розрахункова
<b>T</b>	Температура проведення експерименту	Вимірювана (тип А)
<b>T</b>	Часпоширення пружної хвилі в зразку	Вимірювана (тип А)
<b>n</b>	Девіація притиснення зразка	Розрахункова

**Похибка  $u_c$ , обумовлена неточністю вимірювання ШППХ у зразку.**

Відповідно, комбінована похибка[6], обумовлена неточністю вимірювання швидкості поширення пружної хвилі у зразку має вигляд (2)

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial h}\right)^2 * u_h^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)^2 * u_t^2}, \quad (2)$$

де  $u_h$  – похибка вимірювання висоти зразка в точці прозвучування;  
 $u_t$  – похибка вимірювання часу поширення пружної хвилі у зразку в точці прозвучування.

В табл.2 наведено тип та розрахункові формули для визначення коефіцієнтів впливу для кожної складової сумарної похибки. Як видно з таблиці похибки для вимірювання ШППХ – комбіновані, тому потрібно проаналізувати кожен складову похибок окремо.

Похибка вимірюванням висоти зразка  $u_h$  залежить від плоскопаралельності поверхні (похибка  $u_a$ ), інструментальної похибки мікрометра  $u_{\text{мікр}}$  та похибки обумовленою шорсткістю  $Rz$  поверхонь зразка.

Комбінована похибка [6], обумовлена неточністю вимірювання висоти зразка матиме вигляд (3):

$$u_h = \sqrt{u_{\text{мікр}}^2 + u_a^2}, \quad (3)$$

Таблиця 2 – Похибки вимірювання швидкості поширення пружної хвилі у зразку

Позначення похибки	Тип оцінювання похибки	Коефіцієнт впливу похибки
$u_h$	Комбінована	$\frac{\partial C}{\partial h} = K_h = \frac{1}{t}$
$u_t$	Комбінована	$\frac{\partial C}{\partial t} = K_t = -\frac{h}{t^2}$

Похибка мікрометра розподілена за рівномірним законом розподілу ймовірностей і дорівнює значенню  $\pm \Delta h$ , тоді інструментальна похибка мікрометра [6] рівна:  $u_{\text{мікр}} = \frac{\Delta h}{\sqrt{3}}$ .

Непаралельність поверхонь зразків викликає зменшення донного сигналу й зміну напряму поширення пружної хвилі в зразках, ПЕП і БС, які відповідають максимальній амплітуді найшвидшого луна-сигналу. Результат вимірювання відповідає середньому значенню товщини на ділянці акустичного контакту перетворювача із зразком. Однак точність вимірювання знижується завдяки зменшенню крутості фронту донного сигналу. Для того, щоб розрахувати цю похибку потрібно виміряти висоту зразка  $h$  у чотирьох точках для напрямів прозвучування (див. рис. 1) розташованих на осях симетрії та розрахувати її [5] для кожного напряму прозвучування за формулою (4):

$$u_a = \sqrt{\frac{1}{3} * \sum_{i=1}^4 (h_i - \bar{h})^2}, \quad (4)$$

де  $\bar{h}$  - середнє значення;  $h_i$  - значення в кожній точці.

Товщина контактнoгo шару (шару рідини) змінюється через різну шорсткість поверхні зразку і різний ступінь притискання ПЕП, БС при настроюванні приладу й вимірюваннях ШППХ. В роботі для похилих поверхонь зразків в якості контактнoгo шару між ПЕП і БС, між БС і зразком був використаний мед в рідкому стані [4], який добре проводить ПХ і практично не проникає в пори порошокoгo заліза. ПЕП і БС при цьому опирається на найбільш високі нерівності. У результаті похибка стає випадковою. Для зменшення похибки від зміни товщини контактнoгo шару (особливо істотної при проведенні вимірювань на зразках малих розмірів) підвищують вимоги до чистоти поверхні зразків, стабілізують притиснення перетворювача за допомогою притискнoгo пристрою, виконують налаштування приладу й вимірювання на зразках з однакової шорсткістю поверхні. Також необхідно слідкувати за тим, щоб обидва буферні стрижні знаходились на одній осі і не зміщувались в процесі проведення вимірювань ШППХ.

Зразки для досліджень мали достатню чистоту поверхні ( $R_{z20}$  і *краще*) та приблизно однакову шорсткість, тому похибкою обумовленою шорсткістю поверхні можна знехтувати.

На похибку часу проходження пружної хвилі  $u_t$  впливає температура навколишнього середовища  $T$ , девіація притиснення ПЕП зразка на похилій поверхні  $n$  та метод вимірювання часу ШППХ у зразку.

ШППХ в зразку змінюється в залежності від температури, зазвичай збільшуючись при охолодженні та зменшуючись при нагріванні. Змінюється також швидкість звуку в матеріалі перетворювача. Для виключення цієї похибки прилад повинен забезпечувати вимірювання часу поширення ПХ між поверхнями зразків і не включати в зазначений інтервал час поширення в ПЕП і інших акустичних затримках. Для вимірювань ШППХ використовували буферні стрижні спеціальної форми, які дозволяли проводити вимірювання локально в напрямках зразків вказаних на рис.1, оскільки ПЕП мають форму і розміри, що не дозволяє поміряти локально в цих напрямках час проходження ПХ. Один буферний стрижень був на ПЕП вхідного сигналу, а другий – на ПЕП, який знімав ПХ, що пройшла крізь похилу площину зразків. Слід за-

значити, що в другому буферному стрижні ПХ поширювалася в дальній зоні, а звідси можна зробити висновок, що ПХ проходить не по прямій з першого буферного стрижня, в зразок, а потім в другий буферний стрижень [4].

Дослідження проводились в лабораторних умовах при підтриманні температури в межах  $20 \pm 2$  С, тому температурним впливом на ШППХ можна знехтувати.

При нестійкому положенні ПЕП луна-сигнали спотворюються, що також призводить до неточних показів. В таких випадках зручно використовувати пружинний V-подібний тримач, який нормує ступінь притискання і створює правильну орієнтацію ПЕП до поверхні зразка.

Похибка від девіації притискання зразка входить в інструментальну похибку часу поширення ПХ у зразку.

Похибка затримки імпульсу в електричних колах системи приведе до виникнення систематичної похибки при вимірюванні ШППХ. При ретельному налаштуванні системи  $\Delta t_3$  можна знехтувати порівняно з похибкою вимірювання часу  $\Delta t$ .

Похибка вимірювання часу  $\Delta t$  складається з похибок  $\Delta t_n$  обумовлених впливом двох факторів, а саме:

- похибки вимірювального пристрою;
- похибки, пов'язаної з кінцевою тривалістю пружного імпульсу.

Похибка вимірювального пристрою (вона не перевищує 0.05...0.1%) складається з похибки від нелінійності часових розгортки і обмеженої точності індикаторного пристрою.

Похибка, пов'язана з кінцевою тривалістю пружного імпульсу (рис. 3), пропорційна періоду коливань [3]. Вона дорівнює  $\Delta t_2 = kT/2$ , де  $T$  - період коливань, а  $k$  - частотна стала. Якщо не прийняти спеціальних заходів, то в результаті дії випадкових факторів відлік часу при двох вимірюваннях (при настроюванні й власне вимірюванні часу поширення ПХ) може бути виконаний по двох різних періодах коливань. У цьому випадку  $k=1$  (для приладу із двонапівперіодним випрямлячем  $k=0,5$ ).

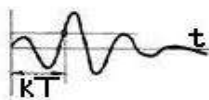


Рис. 3 – Вимірювання імпульсів малої амплітуди  $k \geq 1$ ; тут  $k$  – частотна стала, а  $T$  – період коливань

Щоб уникнути виникнення більших похибок, частіше всього вимірювання проводять по фронту першого напівперіоду коливань або по фронту другого напівперіоду (випрямляч роблять двонапівперіодним). Для забезпечення виконання цієї умови амплітуду імпульсу (рис. 2,а) підтримують постійною, а вимірювання виконують на постійному рівні.

В нашому випадку після проходження ПХ похилих непаралельних площин і перетворення ПХ в електричний сигнал, який не мав чітко виражену синусоїдальну зростаючо-спадаючу форму, дуже важко було визначити де перший період закінчується. Тому було прийнято рішення фіксувати  $t_{i0}$  за появою сигналу, що відповідає найшвидшому променю пружної хвилі і відповідно найменшому часу проходження ПХ, налаштовуючи підсилення вихідного сигналу таким чином щоб його рівень був постійним при всіх вимірюваннях ( $k=0,1$ ). Це дозволило звести до мінімуму вплив шуму на вимірювальний імпульс часу, тому що в нашому методі використовувався радіоімпульс для збудження ПХ. Якщо б був відеоімпульс, який має більшу полосу частот [3], то такий захід не дав би можливості виключити вплив шумової складової на вимірювальний імпульс часу.

Похибка, обумовлена вимірюванням часу [6] поширення ПХ у зразку має вигляд (5):

$$u_i = \sqrt{u_{t_i}^2 + u_{\Delta}^2}, \quad (5)$$

де  $u_{\Delta}$  - похибка, обумовлена методом вимірювання часу поширення ПХ у зразку;

$u_{t_i}$  - це середньоквадратичне відхилення [6] багаторазового вимірювання часу поширення ПХ в одній точці зразка (6):

$$u_{t_i} = \sqrt{\frac{1}{m-1} * \sum_{i=1}^m (t_i - \bar{t})^2}, \quad (6)$$

де  $\bar{t}$  - середнє значення;  $t_i$  - значення в кожній точці,  $m$  - кількість вимірювань.

Щоб оцінити похибку [6], обумовлену методом вимірювання часу поширення ПХ у зразку, оцінимо значення  $\Delta t_{\text{сум}}$  - похибку методу вимірювання часу поширення ПХ у зразку (7):



$$\Delta t_{\text{сум}} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3, \quad (7)$$

$\Delta t_1$ - похибка вимірювального приладу(8):

$$\Delta t_1 = 0,001 * t_{\text{вим}}, \quad (8)$$

де  $t_{\text{вим}}$  - виміряне значення часу поширення ПХ у зразку.

$\Delta t_2$ - похибка, обумовлена частотою дискретизації (9):

$$\Delta t_2 = \frac{1}{f}, \quad (9)$$

де  $f$  - частота дискретизації.

$\Delta t_3$ -похибка[3], обумовлена кутоннахилуповерхні вимірювання (10):

$$\Delta t_3 = \tan \beta * (t - t_0), \quad (10)$$

Похибка методу вимірювання часу поширення ПХ у зразку розподілена за нормальним законом розподілу ймовірностей[6],тому відповідний квантіль нормального розподілу, при довірчій ймовірності 0.95, буде дорівнювати 1.96 (11):

$$u_{\Delta} = \frac{\Delta t_{\text{сум}}}{1,96}. \quad (11)$$

У зв'язку з тим, що сумарна похибка результату вимірювання ШППХ складається з великої кількості стандартних похибок приймається гіпотеза про нормальний закон розподілу результатів вимірювання.

**Результати досліджень.** За розробленою методикою були оцінені похибки вимірювання ШППХ зразків, виготовлених з порошкового заліза (ПРЗ)з додаванням 0,8 % графіту [7] після двох різних технологічних впливів.Отримані похибки результатів вимірювання приведені в таблицях 3 – 6. При розрахунках  $u_h = 2,9 * 10^{-5}$  мм для всіх значень.

Таблиця 3 – Похибки вимірювання часу поширення ПХу зразках після першого технологічного впливу в напрямках 1, 2, 3, 4, 5

Зразок	$u_t * 10^4, c$				
	Напрями				
	1	2	3	4	5
ЗРАЗОК 3 $h_1=16\text{мм}$	28	31	33	35	40
ЗРАЗОК 3 $h_2=20\text{мм}$	7	10	13	16	20

Таблиця 4 – Похибки вимірювання часу поширення ПХ у зразках після другого технологічного впливу в напрямках 1, 2, 3, 4

Зразок	$u_t * 10^4, c$			
	Напрями			
	1	2	3	4
ЗРАЗОК 3 $h_1=14\text{мм}$	25	31	33	34
ЗРАЗОК 3 $h_2=18\text{мм}$	29	34	36	37

Таблиця 5 – Похибки вимірювання ШППХ зразків після першого технологічного впливу в напрямках 1, 2, 3, 4, 5

Зразок	$u_c, м/с$				
	Напрями				
	1	2	3	4	5
ЗРАЗОК 3 $h_1=16\text{мм}$	28	21	17	16	13
ЗРАЗОК 3 $h_2=20\text{мм}$	25	17	14	12	11

Таблиця 6 – Похибки вимірювання ШППХ зразків після другого технологічного впливу в напрямках 1, 2, 3, 4

Зразок	$u_c, м/с$			
	Напрями			
	1	2	3	4
ЗРАЗОК 3 $h_1=14\text{мм}$	26	24	21	15
ЗРАЗОК 3 $h_2=18\text{мм}$	21	19	16	14

В результаті вимірювань і розрахунків були отримані значення розподілу ШППХ від центру симетрії до країв рис.4. Ці графіки слід розуміти так, що у всіх радіальних напрямках по відношенню до осі симетрії зразків значення ШППХ повторювались для обох технологічних впливів і мали однакове значення. Також на графіках для відповідних напрямів прозвучування нанесені значення похибок, які розраховані за методикою викладеною вище. Як видно з графіків ШППХ для похилих поверхонь має нелінійну спадаючу залежність при віддаленні від центру.

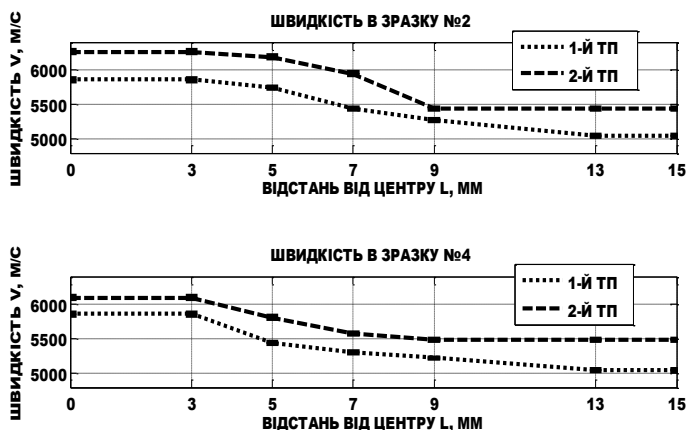


Рис. 4 – Швидкість в зразках: 1-й ТП – перший технологічний вплив; 2-й ТП – другий технологічний вплив

**Висновки.** Розроблена та експериментально досліджена методика оцінки похибки вимірювання ШППХ зразків із порошкового заліза імпульсним ультразвуковим методом.

Результати розрахованих за цією методикою значень похибок ШППХ для досліджуваних зразків з порошкових матеріалів набагато менші від самих значень змін величин ШППХ як в об'ємі матеріалу, так і зміни величин розподілу їх значень після кожної стадії формування матеріалу, що вказує на можливість застосування запропонованої методики для постадійного контролю порошкових матеріалів.

Подальші напрямки роботи, це детальний розбір за законами променевої акустики проходження променя в акустичному тракті, з метою покращення точності вимірювання ШППХ.

**Список літератури:** 1. Бальшин М. Ю., Кипарисов С. С. Основы порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1978. – 184 с. 2. Безьямный Ю. Г. Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств порошковых материалов // Порошковая металлургия - 2001. - № 5-6. - С. 23-33. 3. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. - М.: Мир, 1972. – 238 с. 4. Безьямный Ю. Г., Баглюк Г. А., Євко І. Г., Комаров К. А. Постадійний контроль розподілу властивостей в об'ємі заготовок з порошкового заліза. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Зб. наук. праць. Тематичний випуск "Електроенергетика та перетворювальна техніка". – Харків: НТУ "ХПІ" – № 34. – 2013. – С. 156-162. 5. Дорожовець М. Похибки та непевність результату вимірювання – подібність та відмінність // Вимірювальна техніка та метрологія. – 1996. – Вип. 52. – С. 113-121. 6. Захаров І. П. Теоретическая метрология. – Харьков: ХТУРЕ, 2000. – 172 с. 7. Карасев Н. П. Применения статистических методов в системе менеджмента качества // Вопросы стандартизации и сертификации СО РАН" / 1 - 2007 (г. Новосибирск). 8. Безьямный Ю. Г., Богдан Г. А., Євко І. Г., Іванюк Н. А., Козирацький Е. А. Контроль неоднородності властивостей порошкових матеріалів по результатам акустичних вимірювань // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Зб. наук. праць. Тематичний випуск "Електроенергетика та преобразовательная техника". – Харків: НТУ "ХПІ" – № 19. – 2011. – С. 204-211. 9. Безьямный Ю. Г., Баглюк Г. А., Євко І., Хоменко А. І., Колесников А. М. Акустичний контроль стану порошкового матеріалу в процесі його виготовлення // Акустичний симпозиум "КОНСОНАНС-2009". Збірник праць. – К. – С. 55-60.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bal'shin M. Ju., Kiparisov S. S. *Osnovy poroshkovoj metallurgii*. Moscow: Metallurgija, 1978. 2. Bezimyanniy Y. G. "Vozmozhnosti akusticheskikh metodov pri kontrole struktury i fiziko-mehaničeskikh svojstv poroshkovykh materialov." *Poroshkovaja metallurgija*. 5-6 (2001): 23-33. Print. 3. Trujell R., El'baum Ch., Chik B. *Ul'trazvukovy metody v fiziketverdogotela*. Moscow: Mir, 1972. 4. Bezimyanniy Y. G., Bahljuk G. A., Evko I. G., Komarov K. A. "Postadijnij kontrol' rozpodilu vlastivostej v objemizahotovok z poroshkovohozaliza." *Visnyk NTU "KhPI"*. "Nacional'nyj tehničnyj universitet "Harkivs'kyj politehničnyj instytut". NTU "KhPI", 34 (2013): 156-162. Print. 5. Dorozovec M. *Poxybkytanepevnist rezultatu vimirjuvannja – podobnist i vidminnist*. "Ymirjuvalnatehnikatametrolohija", 52 (1996): 113-121. Print. 6. Zaharov I. P. *Teoreticheska jametrologija*. Har'kov: HTURE, 2000. 7. Karasev N. P. "Primeneniestatisticheskikh metodov vsistememenedzhmentakachestva." *Voprosystandardizaciiisertifikacii "SORAN"*, 1 (2007). 8. Bezimyanniy Y. G., Bogdan G. A., Evko I. G., Kozirackij E. A. "Kontrol' neodnorodnostisvojstvporoshkovykhmaterialovporezultatam akusticheskikh izmerenij. Kharkov." *Visnyk NTU "KhPI"*. "Nacional'nyj tehničnyj universitet "Harkivs'kyj politehničnyj instytut". NTU "KhPI", 19 (2011): 204-211. Print. 9. Bezimyanniy Y. G., Bahljuk G. A., Evko I. G., Xomenko A. I., Kolesnykov A. M. "Akustyschnyj kontrol' stanuporoshkovohomaterialuv procesijohovyhotovlennja." *Akustyschnyjsympozium. "KONSONANS-2009"*. (2009): 55-60. Print.

Поступила (received) 28.05.2014