

З рис.5 видно, що результати, отримані на модельному експерименті з тріщиною від утомленості, підтверджуються і для порошкових пресовок, і для спечених порошкових матеріалів.

**Висновки.** Показано, що при взаємодії акустичного поля малої інтенсивності з двовимірним дефектом виникають нелінійні спотворення амплітудної характеристики другої гармоніки сигналу опромінення матеріалу, величина яких залежить від масштабу й напрямку озвучування, а також від розмірів дефекту.

Показана можливість використання нелінійних ефектів акустичного поля малої інтенсивності для контролю за якістю контактів порошкових матеріалів.

Напрямами розвитку цієї роботи можуть бути використання поперечних пружних хвиль для вирішення розглянутого завдання й перехід до відносних величин при аналізі кореляції нелінійних характеристик прийнятої пружної хвилі й параметрів дефекту.

**Список літератури:** 1. *Косторнов А.Г.* Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. В 2 т. –т.1 – Киев: Наукова думка, 2002. – 572 с. 2. *Бальшин М. Ю.* Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. – М.: Металлургия, 1972. – 336 с. 3. *Косторнов А.Г.* Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. В 2 т. –т.2 – Киев: Наукова думка, 2003. – 552 с. 4. *Роман О.В., Скороход В.В., Фридман Г.Р.* Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. – Мн.: Высш. шк., 1989. – 182 с. 5. *Безьямянный Ю.Г., Талько О.В.* Анализ возможностей акустических методов при контроле контактообразования в порошковых материалах // Электроника и связь. – 2006. – № 1. – С. 48–57. 6. *Незрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В.Клюева.* – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с. 7. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И.П.Голяминой.* – М.: Советская энциклопедия, 1979, – 400 с. 8. *Зайцев В.Ю., Назаров В.Е., Таланов В.И., «Неклассические» проявления микроструктурно обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики // УФН, 2006, т. 176, №1.* 9. *Nazarov V.E., Ostrovsky L.A., Soustova I.A., Sutin A.M.* Nonlinear acoustics of microinhomogeneous media // Phys.Earth & Planet. Interiors, 1988, vol. 50, № 1, pp. 65-73. 10. *V. Tournat, V. Zaitsev, V. Gusev, V. Nazarov, P. Bequin, B. Castagnede.* Probing granular media by acoustic parametric emitting antenna: clapping contacts, nonlinear dilatancy and polarization anisotropy // Phys. Rev. Lett, 2004, vol. 92, № 8, p. 085502. 11. *Грінченко В.Т., Вовк І.В., Мацитура В.Т.* Основи акустики. – К.: Наук. думка, 2007. – 640 с. 12. *Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / Под ред. В.А.Кузьменко.* – К.: Наук. думка, 1979. 336 с. 13. *Безьямянный Ю.Г.* Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошковая металлургия. – 2001. – № 5-6. – С. 23-33. 14. *Исследование корреляции скорости распространения упругой волны с параметрами композита на основе медного порошка с вольфрамовыми включениями / Ю.Г.Безьямянный, Т.А.Епифанцева, Е.А.Козирацкий.* // Акустичний симпозиум «Консонанс-2009». – 36. наук. праць. – Київ. – 2009. - С.83-88. 15. *Исследование корреляции скорости распространения упругой волны с параметрами композита на основе металлических порошков с алмазными включениями. /Ю.Г.Безьямянный, А.Н.Высоцкий, Т.И.Истомина, А.Н.Колесников, Н.Иванюк.* // Акустичний симпозиум «Консонанс-2009». – 36. наук. праць. – Київ. – 2009. - С.79-82.

**Ю.Г. БЕЗЬЯМЯННИЙ**, д-р техн. наук, с.н.с., ІПМ НАН України,  
**Т.О. ЄПІФАНЦЕВА**, к-т. техн. наук, с.н.с., ІПМ НАН України  
**Є.О. КОЗИРАЦЬКИЙ**, здобувач ІПМ НАН України

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ КОМПОЗИТА НА ОСНОВІ МІДНОГО ПОРОШКУ ІЗ ВОЛЬФРАМОВИМИ ВКРАПЛЕННЯМИ НА ШВИДКІСТЬ ПОШИРЕННЯ ПРУЖНОЇ ХВИЛІ

В работе приведены результаты экспериментальных исследований по выявлению корреляции скорости распространения упругой волны с параметрами структуры композита на основе медного порошка с вольфрамовыми включениями. Показано, что эффективная скорость распространения продольной упругой волны связана с размерами и содержанием включений, пористостью, качеством контактов и потому может быть использованная как диагностический параметр указанных свойств композита.

In the article results of experimental researches of detection of correlation of speed of propagation of elastic wave with parameters of structure of a composite on the basis of a copper flour with tungsten inclusions are resulted. It is shown that effective speed of propagation of longitudinal elastic wave is connected with the sizes and contents of inclusions, porosity, quality of contacts and consequently can be used as diagnostic parameter of the specified properties of a composite.

**Вступ.** Композити на основі мідного порошку застосовують як конструкційні матеріали для електрокатодного обладнання, а також як вироби спеціального призначення [1]. При отриманні таких матеріалів з гарантованими властивостями доцільно в процесі їх виготовлення контролювати параметри структури, такі як щільність пресовки, якість контактів, пористість, розміри та вміст компонентів [2,3]. Перспективними для розв'язання цієї задачі є акустичні методи неруйнівного контролю [4] і, перш за все, структурночутливі імпульсні ультразвукові методи, засновані на вимірах параметрів пружної хвилі [5].

**Постановка задачі.** При використанні будь-якого параметру пружної хвилі для діагностики стану структури матеріалу, необхідно встановити, чи є кореляція між діагностичним параметром та параметрами структури досліджуваного композиту і чи можна виділити вплив на нього окремих елементів структури.

У роботі проведена оцінка впливу розміру та вмісту вкраплень, пористості та якості контактів на швидкість поширення пружної хвилі у пресовках на основі мідного порошку із вольфрамовими вкрапленнями. Для цього були проведені виміри швидкості поширення ефективної поздовжньої пружної хвилі у зразках досліджуваного матеріалу, отриманих за різними технологіями, з різним розміром та вмістом вкраплень, різною пористістю. Виокремлення впливу якості контактів на швидкість поширення пружної

хвилі було проведено шляхом порівняння з відомими модельними уявленнями про модулі пружності композитів.

**Експериментальні дослідження.** Для проведення експерименту були виготовлені зразки прямокутної форми із композитів на основі мідного порошку з вольфрамовими вкрапленнями. Характеристики об'єкта досліджень показані на рис.1. Матеріали композитів відрізнялись розмірами частинок матриці  $D_{Cu}$ , а також розмірами  $D_W$  і масовою долею  $Q_W$  вкраплень (див. табл.1). Суміші № 1-13 отримані за технологією холодного пресування,

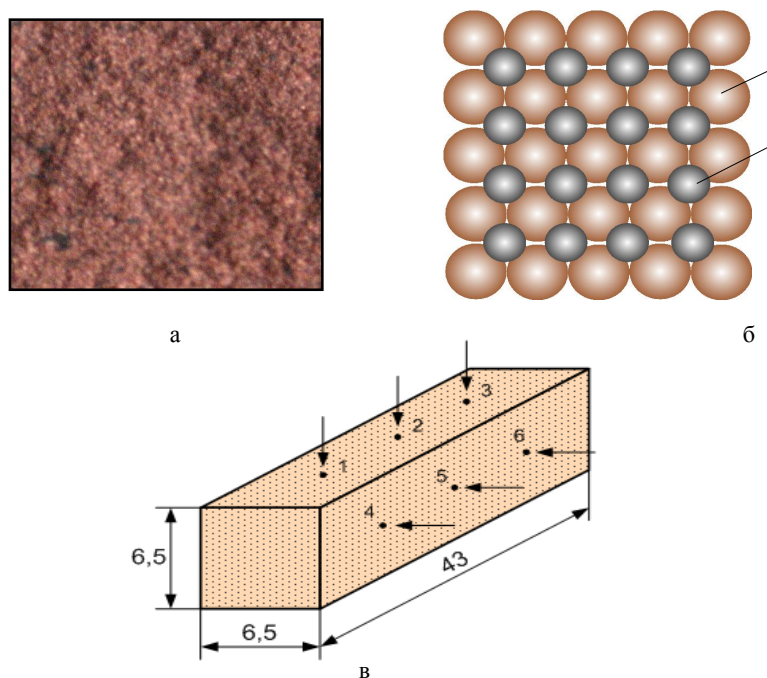


Рис. 1. Характеристики об'єкта дослідження: а – структура матеріалу (x10); б – структурна модель матеріалу, де 1 – частинка міді, 2 – частинка вольфраму; в – досліджуваний зразок, де стрілками показані напрямки прозвучування у різних точках

а № 14 та 15 – гвинтової екструзії [6]. Зразки були розділені на 6 груп сумішей. У кожній групі змінювався лише один параметр структури матеріалу. Розміри зразків дозволяли статистично осереднювати властивості матеріалу в об'ємі озвучування [7].

Швидкість поширення пружної хвилі визначалась за часом наскрізного проходження пружного імпульсу через досліджуваний зразок. Вимірювання

часу проходження проводилось методом радіоімпульсу з дискретною затримкою [8].

Структурна схема вимірювань показана на рис.2. В акустичній вимірювальній камері за допомогою спеціального притискного пристрою між випромінюючим та приймальним перетворювачами встановлювався досліджуваний зразок. З виходу генератора на випромінюючий перетворювач з резонансною частотою 5 МГц подавалась періодична послідовність електричних прямокутних імпульсів. Перетворений сигнал проходив через контактний шар, досліджуваний зразок, другий контактний шар і надходив на приймальний перетворювач. Далі він трансформувался у електричний сигнал і через підсилювач надходив на осцилограф, де, за допомогою вимірювача часових інтервалів, вимірювався час затримки  $t_{вим}$  між моментом запуску генератора і приходом сигналу на вхід осцилографа. Для компенсації систематичної похибки вимірювань, обумовленої часом проходження сигналу без досліджуваного зразка  $t_0$ , проводились аналогічні вимірювання при відсутності зразка між п'єзоперетворювачами.

Таблиця

Характеристики досліджуваних матеріалів

Група №	Суміш №	Розмір частинок		Вміст вкраплень $Q_W$ , мас. %	Пористість П, %	Середнє значення швидкості, м/с		Модуль пружності Е, ГПа
		$D_{Cu}$ , мкм	$D_W$ , мкм			У напрямку пресування	Перпендик. напрямку пресування	
1	1	+50	15	50	23	907	1145	81
	2	+50	28	50	23	957	1248	90
	3	+50	100	50	23	782	1047	60
2	4	-50	15	50	23	950	1286	89
	5	-50	28	50	23	987	1346	96
	6	-50	100	50	23	845	1139	70
3	7	+50	15	20	23	737	1097	44
	8	+50	28	20	23	769	1124	48
4	9	+50	100	20	23	632	979	32
	10	-50	15	20	23	737	1097	44
5	11	-50	15	50	23	992	1301	97
	12	-50	28	20	23	693	997	39
6	13	-50	28	50	23	987	1292	96
	14	+50	10	50	10	4272	3969	179
	15	+50	100	50	1	3035	3540	90

У якості контактної рідини застосовувалась вода. Для захисту зразка від

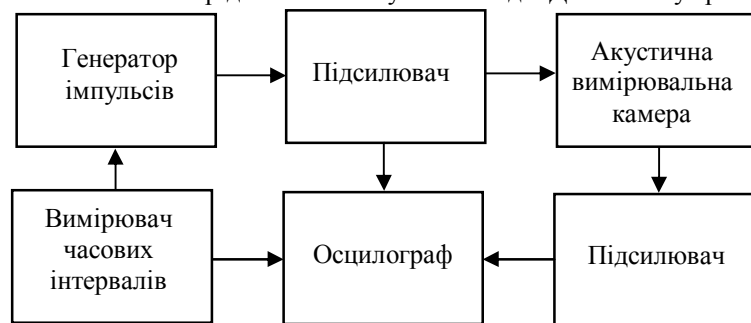


Рис. 2. Структурна схема вимірювань

впливу контактної рідини використовувалась плівка товщиною 0,13 мм.

Товщина зразків  $h$  вимірювалась мікрометром.

Швидкість поширення пружної хвилі визначали за формулою:

$$C = \frac{h}{t_{вим} - t_0} \quad (1)$$

Для описаної методики похибка визначення швидкості поширення пружної хвилі у досліджуваних зразках складає не більше ніж 0,5 %.

Прозвучування зразків проводилось в двох напрямках: у напрямку пресування і перпендикулярно напрямку пресування. Для врахування розкиду властивостей матеріалу по об'єму заміри часу проходження пружної хвилі через зразок були виконані у трьох точках для кожного напрямку, а швидкість для кожного напрямку визначалась за усередненим значенням часу. Отримані результати усереднювались для 3-4 однакових зразків. Результати експерименту наведено у табл.1 й на рис.3 та 4.

На рис.5 приведені експериментальні залежності швидкості поширення пружних хвиль від пористості для 4-х різних сумішей композитів. Тут використані результати попереднього експерименту [9].

**Оцінка модуля пружності.** Для визначення модуля пружності використовували два підходи: за експериментально визначеними ефективними швидкостями поширення пружних хвиль та за відомими модельними уявленнями.

**За експериментально визначеними ефективними швидкостями поширення пружних хвиль.** У однорідному ізотропному твердому середовищі зв'язок характеристик пружності (модуля Юнга  $E$  і коефіцієнта Пуассона  $\nu$ ) та щільності  $\rho$  матеріалу зі швидкістю поширення поздовжньої пружної хвилі визначається відомою [10] формулою:

$$E = \frac{C^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (2)$$

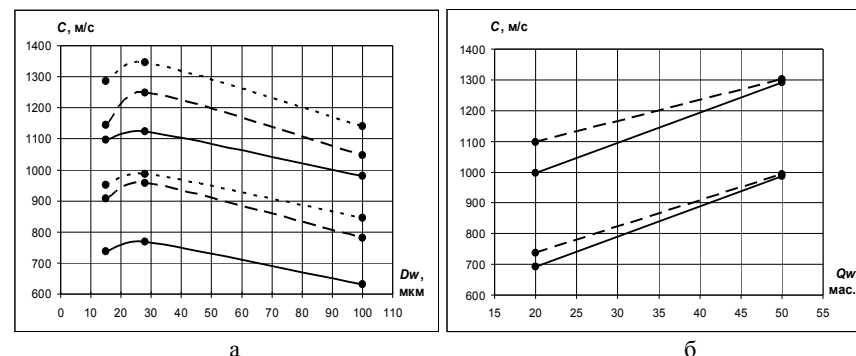


Рис. 3. Залежності швидкості поширення пружної хвилі від розміру (а) та масової частки вольфрамових вкраплень (б) в зразках, отриманих за технологією холодного пресування. Номер кривої співпадає з групою суміші у табл.1. (відсутність індексу "п" відповідає напрямку пресування, а наявність – напрямку, перпендикулярному пресуванню)

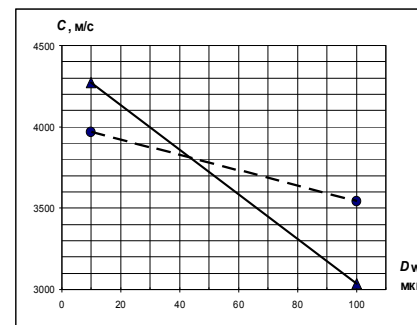


Рис. 4. Залежності швидкості поширення пружної хвилі від розміру вольфрамових вкраплень в зразках, отриманих методом гвинтової екструзії: б<sub>п</sub> – у напрямку пресування; б<sub>н</sub> – у напрямку, перпендикулярному пресуванню

Формула (2) залишається справедливою для досліджуваних композитів за умови, що величини, які у неї входять, замінюються їх ефективними значеннями для відповідного середовища. При цьому для багатозначних матеріалів ефективні значення можуть бути знайдені за допомогою різних методів усереднення [11].

Ефективне значення швидкості поширення пружної хвилі було знайдено в результаті експерименту.

Ефективне значення коефіцієнта Пуассона як функції пористості  $\theta$  визначається за формулою [12]:

$$\nu_e = \nu_0 (1 - \theta), \quad (3)$$

враховуючи, що для обох компонентів матеріалу за відсутності пористості він має однакове значення:  $\nu_o = 0,35$  [13]. Тоді при  $\theta = 0,23$   $\nu_e = 0,27$ .

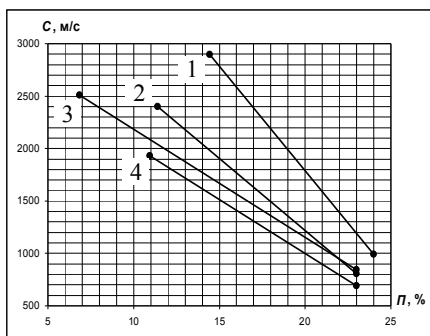


Рис. 5. Залежності швидкості поширення пружної хвилі від пористості для різних сумішей композитів: 1 – Cu-50 50W28; 2 – Cu-50 20W28; 3 – Cu-50 50W100; 4 – Cu-50 20W28

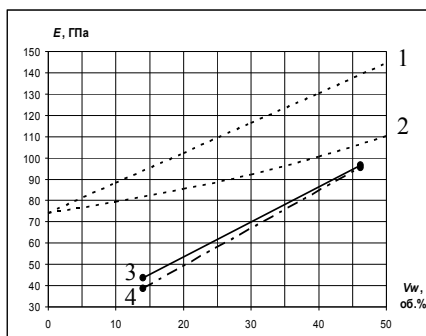


Рис. 6. Функціональні та емпіричні залежності модуля пружності від об'ємної доли вольфрамових вкраплень

Ефективне значення щільності як функції пористості визначається за формулою [12]:

$$\rho_e = \rho_{eo}(1 - \theta), \quad (4)$$

де для двохкомпонентного безпористого матеріалу [13]:

$$\rho_{eo} = \frac{\rho_{Cu}\rho_W \cdot 100}{\rho_W Q_{Cu} + \rho_{Cu} Q_W}, \quad (5)$$

де  $Q_{Cu}$ ,  $Q_W$  – відсоткове співвідношення компонентів за масою, причому  $\rho_{Cu} = 8,96$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_W = 19,32$  г/см<sup>3</sup> [13]. В результаті розрахунків за формулами (4) і (5) суміші № 1-6, 11-15 мають щільність  $\rho_e = 12,24$  г/см<sup>3</sup>; суміші № 7-10 і 12 – 10,04 г/см<sup>3</sup>.

Для нашого випадку отримаємо

$$E_e \approx 0,8\rho_e C_e^2 \quad (6)$$

**За відомими модельними уявленнями.** У відповідності до [4] залежність ефективного модуля пружності від пористості визначається за формулою:

$$E_e = E_{eo}(1 - \theta)^2 \approx 0,59E_{eo}, \quad (7)$$

Граничні значення  $E_{eo}$  можна визначити за формулами Рейеса і Фойгхта [11] для двохкомпонентного матеріалу:

$$\frac{1}{E_{Re0}} = \frac{V_{Cu}}{E_{Cu0}} + \frac{V_W}{E_{W0}}; \quad E_{Fe0} = V_{Cu}E_{Cu0} + V_W E_{W0} \quad (8)$$

де  $V_{Cu}$ ,  $V_W$  – об'ємна концентрація відповідного матеріалу,  $E_{Cu0} = 125$  ГПа,  $E_{W0} = 362$  ГПа [13].

На рис.6 показані функціональні залежності (1, 2), отримані за формулами (7) і (8), та експериментальні значення (3, 4), отримані за результатами вимірювань швидкості поширення пружної хвилі з використанням формули (6) для груп зразків 4 і 5.

**Аналіз результатів.** З рис.3 та 5 видно, що ефективна швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі корелює з розміром та вмістом вкраплень, а також пористістю. Причому, для усіх груп сумішей характер впливу вказаних параметрів структури подібний. Відхилення впливу розмірів вкраплень на ефективну швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі від лінійного закону (рис.3а) суттєво перевищує похибку вимірів. Дослідження на інших матеріалах [14] дають підставу пояснювати отриману нелінійність нерегулярністю формування якості контактів у пресовках.

З рис.3 видно, що ефективна швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі у напрямку пресування зразка менша, ніж у перпендикулярному напрямку. Отримане підтверджує теорію М.Ю.Бальшина [12] і експериментальні результати О.В.Романа із співавторами [4] про вплив на властивості матеріалу площинних дефектів несформованих контактів. Цей же факт підтверджують результати, наведені на рис.4. При формуванні пресовок за технологією гвинтової екструзії напрям пресування не співпадає з напрямом формування дефектів контактів і тому не корелює з напрямом прозвучування.

По аналогії з двофазним матеріалом [15], у досліджуваному ефективну швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі  $C_e$  можна записати як функцію від властивостей матеріалу та його компонентів (матриці та вкраплень, порового простору і якості контактів) у наступній формі:

$$C_e = C_{eo} K_{\Gamma} K_K, \quad (9)$$

де  $C_{eo}$  – ефективна швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі у двокомпонентному безпористому матеріалі;  $K_{\Gamma}$ ,  $K_K$  – коефіцієнти, що враховують пористість і якість контактів між окремими елементами мезоструктури.

Оскільки пористість досліджуваних матеріалів однакова (групи 1-5), а формули (7) і (8) для розрахунку функціональних залежностей не враховують контактних явищ у матеріалах пресовок, то саме впливом недосконалих контактів можна пояснити суттєво менші значення експериментально отриманих модулів пружності у порівнянні з теоретичними. При цьому з

рис.6 видно, що у неспечених пресовках недосконалі контакти є визначальними у величині модуля пружності матеріалу.

**Висновки.** Виявлений кореляційний зв'язок ефективної швидкості поширення поздовжньої пружної хвилі з параметрами структури (розмірами та відсотковим вмістом частинок, пористістю, якістю контактів між частинками) неспечених пресовок з композитів на основі мідного порошку з вольфрамовими вкрапленнями. Показано, що вплив кожного параметра структури можна виокремити за допомогою експериментальних чи розрахункових методів.

Отримані результати дозволяють рекомендувати ефективну швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі як діагностичний параметр для відпрацювання структури і властивостей гетерогенних пресовок з порошкових композиційних матеріалів на основі пластичної матриці і твердих вкрапель.

Подальший напрямок досліджень пов'язаний з отриманням та аналізом статистичних даних для вивченням нерегулярності формування контактних явищ при формуванні пресовок.

**Список літератури:** 1. *Сердюк Г.Г., Епифанцева Т.А., Державец Л.И.* Применение порошкового материала для нефтяных и газовых скважин. // Порошковая металлургия. – 1990. – №4. – С.38-42. 2. *Косторнов А.Г.* Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. В 2 т. –т.1 – Киев: Наукова думка, 2002. – 572 с. 3. *Косторнов А.Г.* Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. В 2 т. –т.2 – Киев: Наукова думка, 2003. – 552 с. 4. *Роман О.В., Скороход В.В., Фридман Г.Р.* Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. – Мн.: Выш. шк., 1989. – 182 с. 5. *Безьянный Ю.Г.* Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошковая металлургия. – 2001. – № 5-6. – С. 23-33. 6. Компактирование порошковой меди с УМЗ структурой методом комбинированного прессования / Я.Е. Бейгельзимер, А.С. Сынков, Т.Т. Мороз, Т.П. Заика, Н.Н. Белоусов, А.А. Коваленко // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 8. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: „Системні технології”. – 2005.– с. 508-510. 7. *Безьянный Ю.Г.* Акустическое отображение материалов, изготовляемых методами порошковой металлургии. / Акустичний вісник. – т. 9. № 2. – 2006. – С. 3–16. 8. *Труэлл Р., Эльбаум, Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972. – 302 с. 9. Исследование влияния состава и структуры на скорость ультразвука в порошковом материале с медной матрицей и вольфрамовыми включениями / *Ю.Г.Безьянный, Т.А.Епифанцева, Л.О.Тесленко, Е.А.Козирацкий* // Тез. докл. V международ. конф. Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследование, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий: Большая Ялта, Жуковка, 2008. – С. 296. 10. *Ландау Л. Д., Лившиц Е. М.* Теория упругости. – М., 1965. 11. *Скороход В.В.* Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах // Порошковая металлургия. – 1995. – № 1/2. – С.53-70. 12. *Бальшин М. Ю.* Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. – М.: Металлургия, 1972. – 336 с. 13. *Физические величины: Справочник / Под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова.* – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. 14. *Безьянный Ю.Г., Кузнецкий А.Е., Силенко Р.В.* Акустическое отображение нерегулярности формирования свойств полидисперсного порошкового железа. / Электроника и связь. 2005. - № 28. – С. 78-82. 15. *Безьянный Ю. Г.* Использование акустических характеристик для контроля структуры пористых материалов // Электронная микроскопия и прочность материалов. – К. – 1999. – С. 93–105.

УДК 681.121.4

*А.К. ГОЛОВИНА*, студ., ДВНЗ «ДонНТУ»,  
*А.А. ЗОРИ*, д-р техн.наук проф., ДВНЗ «ДонНТУ»,  
*В. П. ТАРАСЮК*, к-т техн. наук, доц., ДВНЗ «ДонНТУ»,

## ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОГО РАСХОДА ТЕПЛА НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКА И ПЬЕЗОКЕРАМИКИ

В данной работе аргументирована необходимость контроля расхода тепла в высотных зданиях, оборудованных автономными котельными. Предложена структура прибора с применением микропроцессорной технологии. В основу прибора входит пьезокерамика, обеспечивающая не только точность ультразвукового метода измерений, но и высокую эксплуатационную надежность приборов.

In this article was argued the need to control heat flow in high-rise buildings equipped with independent boilers. Proposed develop a device using microprocessor technology and piezoceramic elements, which provides accuracy of the ultrasonic measurement method and the reliability of devices too.

**Введение.** Системы учета тепла становятся необходимыми, как потребителям тепла, так и его поставщикам. Основным критерием качества систем теплоснабжения является отсутствие температурного дискомфорта в помещениях и постоянное наличие горячей воды с определенной температурой в требуемом объеме. Это достигается за счет внедрения автономных котельных, функционирующих по принципу полной автоматизации технологического процесса. Важным преимуществом децентрализованных систем теплоснабжения является возможность местного регулирования в системах квартирного отопления и горячего водоснабжения. Однако эксплуатация источника теплоты и всего комплекса вспомогательного оборудования квартирной системы теплоснабжения жильцами не всегда дает возможность в полной мере использовать это преимущество. Последние исследования показали [1], что существует необходимость контроля потерь тепла на каждом этаже. Для того, чтобы не привлекать ремонтно-эксплуатационную организацию для обслуживания источников теплоснабжения необходимо не только в квартирах, но и на каждом этаже установить теплосчетчики, для оперативного слежения за потерями тепла в здании и управления процессом теплоснабжения.

### Анализ литературы.

Анализ разработок по этой теме позволил сделать вывод, что для контроля расхода воды и тепла существуют различные приборы и системы. Одними из их основных недостатков являются относительно высокая погрешность измерения и недостаточная метрологическая надежность. Эту проблему в автономных котельных можно решить путем использования ультразвуковых расходомеров, работающих на принципе изменения времени прохождения ультразвукового сигнала от источника до приемника, которое