

**Ю. Г. БЕЗИМЯННИЙ**, д-р техн. наук, зав. від., ІПМ НАН України, Київ;  
**Г. А. БАГЛЮК**, д-р техн. наук, заст. дир., ІПМ НАН України, Київ;  
**І. Г. ЄВКО**, пошукач, асист., НТУ України «ХПІ», Київ;  
**К. А. КОМАРОВ**, наук. співр. ІПМ НАН України, Київ

## ПОСТАДІЙНИЙ КОНТРОЛЬ РОЗПОДІЛУ ВЛАСТИВОСТЕЙ В ОБ'ЄМІ ЗАГОТОВОК З ПОРОШКОВОГО ЗАЛІЗА

В роботі на прикладі порошкового заліза експериментально показано, що за результатами вимірів швидкості поширення пружної хвилі може бути проведений постадійний контроль розподілу властивостей в об'ємі заготовок порошкового матеріалу, конфігурація яких змінюється після кожної стадії технологічного процесу.

**Ключові слова:** властивості матеріалу, швидкість поширення пружної хвилі, порошокове залізо, технологічний процес, акустичний хвилевід, променева акустика.

**Вступ.** Створення методами порошкової металургії нових матеріалів із спеціальними, наперед заданими властивостями потребує використання відповідних технологічних процесів, які включають в себе постадійне формування в напівфабрикаті виробу певної структури [1]. Для забезпечення можливості впливу на хід цього процесу необхідне знання реальних властивостей матеріалу після кожної стадії обробки, яке може бути отримане за допомогою ультразвукових та резистометричних методів неруйнівного контролю [2]. Швидкість поширення (ШП) пружної хвилі (ПХ) є акустичним відображенням фізико-механічних властивостей порошкового матеріалу [3].

Сучасні технології порошкової металургії [4] передбачають наявність неоднорідних деформацій на проміжних стадіях формування матеріалу. При цьому виникає зміна конфігурації напівфабрикату, його структурна неоднорідність і градієнт властивостей в об'ємі матеріалу [5]. Дослідження цих явищ потребує розробки відповідних методів неруйнівного контролю.

**Аналіз останніх досліджень та літератури.** ШППХ для дослідження властивостей порошкових матеріалів використовують майже спочатку існування порошкової металургії [6]. На сьогодні для досліджень властивостей порошкових матеріалів використовують три основних напрямки вимірювань ШППХ: імпульсні [7], резонансні [8] та спектральні методи [9]. У кожному з них виміри потребують наявності у досліджуваному зразку, принаймні, двох паралельних площин. Відомі [10] методи вимірів ШППХ у компактних матеріалах не можуть бути безпосередньо перенесені на порошкові матеріали у зв'язку з особливостями будови останніх [3].

**Мета роботи.** Обґрунтувати, розробити та експериментально перевірити акустичний метод неруйнівного контролю та методика для фіксування зміни

властивостей в об'ємі заготовок складної форми з порошкового матеріалу після різних стадій виготовлення.

**Постановка проблеми.** Виготовлені за традиційними технологіями зразки порошкового матеріалу мали, принаймні, дві площинно-паралельні поверхні. При наявності на стадії виготовлення інтенсивних зсувних деформацій напівфабрикат вже має не паралельні поверхні, розташовані одна відносно другої за певним законом. Властивості матеріалу теж розподілені в його об'ємі за певним законом, який може змінюватися від стадії до стадії. Виникає проблема поетапного неруйнівного контролю розподілу властивостей в об'ємі матеріал

**Матеріали досліджень.** В роботі за результатами вимірів ШППХ проведено дослідження закономірностей розподілу властивостей в об'ємі заготовок з порошкового заліза після кожної з трьох стадій технологічного процесу.

На першій стадії було проведено холодне пресування та спікання вихідного порошку заліза (розміри частинок не перевищували 160 мкм) із додаванням 0,8 % графіту і отримані пористі циліндричні заготовки (рис. 1, *а*) двох типорозмірів: діаметром 30 мм і висотою 14 мм й 18,5 мм. По одній заготовці кожного типорозміру було залишено без подальших змін як свідки. Інші заготовки обробляли на подальших стадіях технологічного процесу.

На другій і третій стадіях для зменшення пористості ці заготовки зазнали холодного штампування з реалізацією інтенсивних зсувних деформацій у різних напрямках. При незмінному діаметрі висота зразків зменшувалася, а їхні поверхні перестали бути плоско-паралельними за рахунок появи посередині циліндричних заготовок симетричних пустот у вигляді усічених конусів (рис. 1, *б*). Після другої стадії заготовки мали висоту циліндра 16 мм й 20 мм, а після третьої стадії – 14 мм й 18 мм.

Після першої стадії ШППХ у заготовках вимірювали методом радіоімпульсу з дискретною затримкою [10] при наскрізному проходженні пружного імпульсу через відповідну область заготовки. Напрями прозвучування наведено на рис. 1, *а*. Структурна схема і результати вимірювань після першої стадії детально розглянуті в [11], а дослідження неоднорідності цих зразків – у [7]. Похибка визначення ШППХ для плоских паралельних площин заготовок не перевищувала 0,5 %.

Напрями прозвучування заготовок після другої та третьої стадії пресування наведено на рис. 1, *б*. Як видно з цього рисунку, ПХ проходить в зразку зони із площинно-паралельними (тт. 1 й 5) та конусними (тт. 2-4) поверхнями. У зоні, яка відповідає тт. 5 вимірювання ШППХ проводили за тою ж схемою, що й після першої стадії. В інших зонах використання цієї схеми прозвучування було неможливе з-за наявності похилих поверхонь (тт. 2-4) та (чи) обмеженого доступу (тт. 1-4). Для вимірювання ШППХ у цих зонах були розроблені оригінальні пристрій і відповідна методика прозвучування зразків з непаралельними поверхнями.

Схему прозвучування важкодоступних зон з непаралельними поверхнями показано на рис. 2. Відповідно до цієї схеми ПХ вводили в заготовку через

кондуктор 1 під кутом  $\alpha$  від нормалі до поверхні зразка. При переході через поверхню поділу кондуктора 1 та зразка ПХ заломлювалася відповідно закону Снеліуса та поширювалася у зразку під кутом  $\beta$  від нормалі до поверхні зразка. На поверхні поділу зразка та кондуктора 2 ПХ знову заломлювалася відповідно закону Снеліуса, проходила через кондуктор 2 та потрапляла на приймальний п'єзодавач.

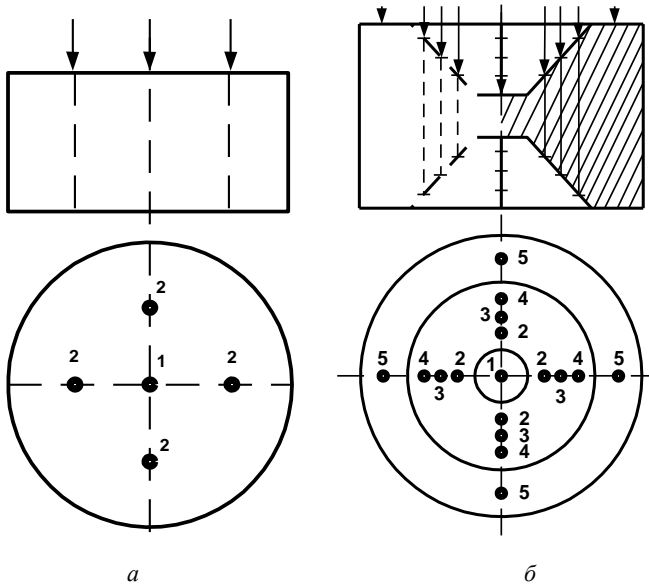


Рис. 1 – Зразки для досліджень та схема їх прозвучування: *a* – після першої, *б* – другої і третьої стадій.

Відпрацювання методики вимірів проводили на зразку з оргскла, у якого однакове для всього об'єму матеріалу значення ШППХ. Форма і розміри цього зразку були вибрані такі самі, як розміри зразків з порошкового заліза після другої стадії. Час поширення ПХ через всі складові акустично тракту фіксували за найпершою хвилею, яка потрапляла в приймальний п'єзодавач. Знання ШППХ в зразку дозволили експериментально визначити похибки, пов'язані з використанням кондукторів. Похибка визначення ШППХ для поверхонь усічених конусів не перевищувала 1,3 %.

Особливості поширення ПХ в акустичних трактах, де зразками є порошкове залізо та оргскло, досліджено шляхом моделювання. З акустичної точки зору кондуктор є хвилеводом. Шлях ПХ у зразку та кондукторах розраховували відповідно до променевого наближення за методикою [12]. Було побудоване акустичне поле тракту як суперпозиція окремих незалежних променів. Для

цього будували можливі промені поширення ПХ з кроком  $1^\circ$ . Шукали найбільш швидкий промінь, за яким в експерименті проводили вимірювання. Результати моделювання для зразків з оргскла (а) та порошкового заліза (б) показано на рис. 3 (виділено найбільш швидкий промінь) та у таблиці. Тут  $\gamma$  – кут падіння ПХ із зразка на кондуктор 2 (див. рис. 3), а  $t$  – час поширення ПХ у зразку висотою 16 мм. З даних таблиці видно, що для заготовки з порошкового заліза похибки вимірювань більші ніж розкид часу поширення променів.

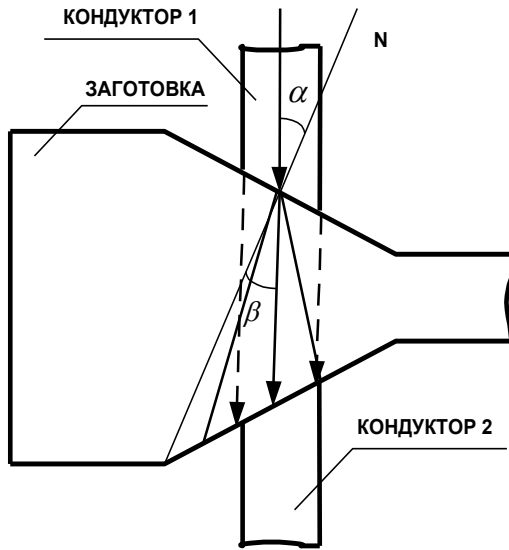


Рис. 2 – Схема проходження пружної хвилі крізь зразок з використанням кондукторів

Таблиця – Час поширення різних променів пружної хвилі у зразку

N, п/п	Порошкове залізо		Оргскло	
	$\gamma$ , град.	$t$ , мкс	$\gamma$ , град.	$t$ , мкс
1	26	5,342	21	7,209
2	27	5,339	22	7,253
3	28	5,337	23	7,347
4	29	5,335	24	7,448
5	30	5,331	25	7,631
6	31	5,330	26	7,934
7	32	5,331	-	-
8	33	5,332	-	-
9	34	5,333	-	-

Як видно з рис. 3 і таблиці променева картина для оргскла і порошкового заліза суттєво відрізняються. Це вказує на можливість удосконалення методики вимірів шляхом вибору матеріалу кондуктора узгодженого з матеріалом зразка.

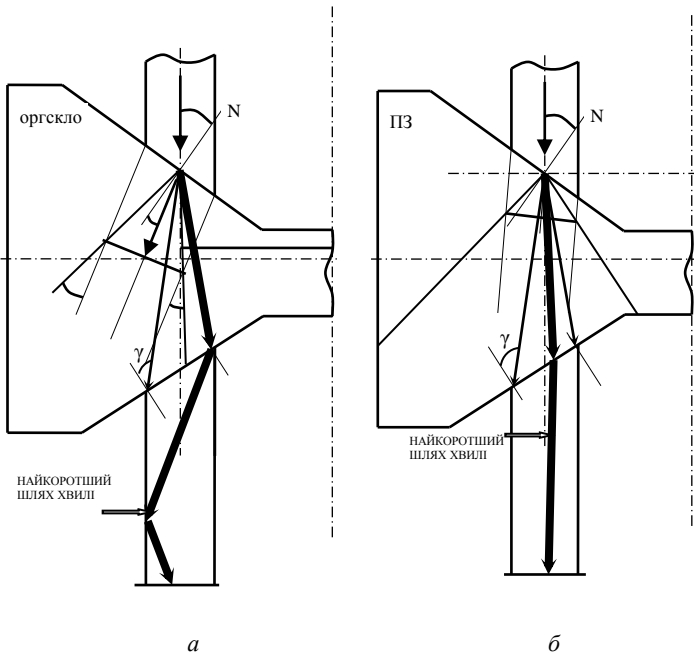


Рис. 3 – Проходження найкоротшого променя: *а* – в оргсклі; *б* – в порошковому залізі

**Результати досліджень.** Графіки зміни ШППХ після кожної стадії виготовлення напівфабрикатів з порошкового заліза як функція радіусу для зразків різного розміру наведено на рис. 4. З цих даних видно особливості розподілу властивостей у внутрішньому об'ємі зразків після кожної стадії і можна проводити співставлення абсолютного значення та розподілу цих властивостей на кожній стадії та між стадіями.

Аналіз отриманих результатів дозволяє сказати наступне:

- після першої стадії в заготовках спостерігалася значна неоднорідність структури в напрямках прозвучування 2, яку можна пояснити нерівномірністю температурного поля в печі, а також різницею розподілу різних фракцій частинок в об'ємі заготовки при спіканні та формуванні;
- після другої стадії радіальна неоднорідність структури заготовки, притаманна першій стадії повністю відсутня. Поверхні заготовок були досить чіткими практично без візуальних дефектів і характерної післядії для такого технологі-

чного впливу в центрі заготовки в напрямі 1 (див. рис. 1, б). Для цієї стадії характерний виражений спад швидкості пружної хвилі від центру для обох заготовок. Це засвідчує, що запропонована методика вимірів ШППХ чутлива до градієнтних змін властивостей в об'ємі заготовок;

– для третьої стадії характерне зменшення розмірів на 2 мм по висоті в порівнянні з другою стадією, що свідчить про ще більше ущільнення заготовок і підтверджується найбільшими значеннями ШППХ (див. рис. 4). Радіальна неоднорідність властивостей була відсутня. Але візуально після цієї стадії на центральних поверхнях, особливо в центрі усічених конусів заготовок були помітні досить значні тріщини та випуклість поверхні вгору та вниз в напрямі прозвучування 1 (див. рис. 1, б). Це можна пояснити характерною післядією для такого стадійного впливу та значним тиском пуансону. Звідси можна зробити висновок, що третій технологічний вплив привів до перепресування з частковим розривом утворених після другої стадії консолідаційних зв'язків між частинками порошкового заліза.

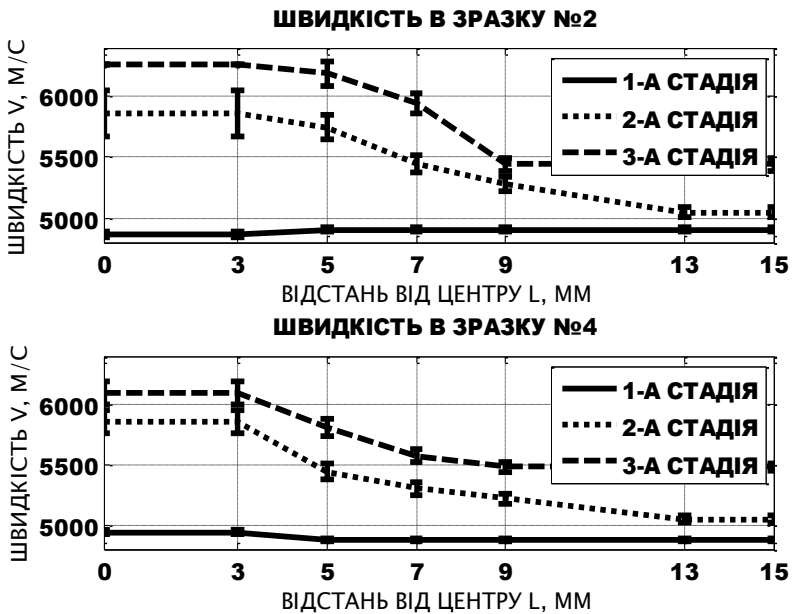


Рис. 4 – Розподіл величини швидкості поширення пружної хвилі в зразках після кожної з 3-х стадій

**Висновки.** На прикладі порошкового заліза експериментально показано, що за результатами вимірів швидкості поширення пружної хвилі може бути проведений поетапний контроль розподілу властивостей в об'ємі заготовок

порошкового матеріалу, конфігурація яких змінюється після кожної стадії технологічного процесу.

Подальший розвиток роботи пов'язаний з необхідністю вдосконалення методики за рахунок статистичної обробки результатів вимірювань та вдосконалення акустичного тракту з використанням кондукторів.

**Список літератури:** 1. *Бальшин М. Ю.* Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. – М.: Металлургия, 1972. – 336с. 2. *Роман О. В.* Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии / О. В. Роман, В. В. Скороход, Г. Р. Фридман – Мн.: Высш. шк., 1989. – 182с. 3. *Безьямный Ю. Г.* Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошковая металлургия. – 2001. – № 5/6. – С. 23-33. 4. *Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя* / Відп. ред. І. К. Походня. - Київ: Наук. думка, 1998. С. 447-472. 5. *Баглюк Г. А.* Моделирование процесса уплотнения слоистых пористых заготовок // Порошковая металлургия. – 2007. – №5/6. – С.16-21. 6. *Бальшин М. Ю., Китарисов С. С.* Основы порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1978.– 184 с. 7. *Безьямный Ю. Г.* Контроль неоднородности свойств порошковых материалов по результатам акустических измерений / Ю. Г. Безьямный, Г. А. Богдан, И. Г. Евко, Н. А. Иванов, Е. А. Козирацкий // Вестник Национального технич. университета "ХПИ". Сб. науч. трудов. Тематический выпуск "Электроэнергетика и преобразовательная техника". – Харьков: НТУ «ХПИ» – № 19. – 2011. –С.204-211. 8. *Луговской Ю. Ф.* Вибродеформационные свойства конструкционных, композиционных и высокопористых спеченных материалов // Порошковая металлургия. – 2006. – №7/8. – С.87-98. 9. *Vdovychenko O.* Effect of microstructure on Young's modulus of extruded Al-SiC composites studied by resonant ultrasound spectroscopy / O. Vdovychenko, V. Voropaev, A. Slipenyuk // Journal of Materials Science – 2006. - V.41 - N24 - P. 8329-8338. 10. *Незрушаючий контроль і діагностика: Справочник* / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с. 11. *Безьямный Ю. Г.* Акустический контроль состояния порошкового материала в процессе его изготовления / Ю. Г. Безьямный, Г. А. Баглюк, И. Г. Евко, А. И. Хоменко, А. Н. Колесников // Акустичний симпозіум «Консонанс-2009». Зб. наук. праць. – Київ. – 2009. – С. 55-60. 12. *Ультразвуковой контроль материалов: [Справ. изд.] / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер;* Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1991. 752 с.

*Надійшла в редколегію 15.04.2013*

УДК 620.179.16

**Постадійний контроль розподілу властивостей в об'ємі заготовок з порошкового заліза** / Ю. Г. Безьямный, Г. А. Баглюк, І. Г. Євко, К. А. Комаров // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та термодинамічна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 34 (1007). – С. 156–162. – Бібліогр.: 12 назв.

В работе на примере порошкового железа экспериментально показано, что по результатам измерений скорости распространения упругой волны может быть проведен постадийный контроль распределения свойств в объёме заготовок порошкового материала, конфигурация которых изменяется после каждой стадии технологического процесса.

**Ключевые слова:** свойства материала, скорость распространения упругой волны, порошковое железо, технологический процесс, акустический волновод, лучевая акустика.

It has been shown experimentally by the example of powder iron that the results of elastic wave velocity measurements allow the stage-by-stage control over the property distribution through the volume of a powder material bar. Configuration of these bars changes after every stage of technological process.

**Keywords:** material properties, elastic wave velocity, powder iron, technological process, acoustic waveguide, ray acoustics.