

УДК 620.179.16

Р. М. ГАЛАГАН, канд.техн. наук, ст. викл. НТУУ «КПІ», Київ

РОЗРОБКА СТОХАСТИЧНОЇ МОДЕЛІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ВИРОБІВ ПОРОШКОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ

Обґрунтовано розробку стохастичної моделі ультразвукового неруйнівного контролю виробів порошкової металургії у вигляді лінійної системи, яка має породжуючий процес, власну імпульсну реакцію та відгук при наявності дефекту. В результаті виділено інформаційні параметри, за якими можна проводити класифікацію технічного стану виробу – зміна математичного сподівання та дисперсії вибірок вимірних значень швидкості ультразвуку.

Ключові слова: вироби порошкової металургії, фізико-механічні властивості, стохастична модель, ультразвуковий контроль, швидкість ультразвуку.

Вступ. Вироби порошкової металургії (ПМ) сьогодні використовуються в широкому спектрі галузей: від автомобільної та аерокосмічної промисловості до електроінструментів та побутової техніки. Технологія ПМ продовжує стрімко розвиватися; її основною перевагою є те, що вона дозволяє отримати нові матеріали – псевдосплави з компонентів, які неможливо сплавити литтям, з керованими характеристиками: механічними, магнітними, електричними, тепловими та ін. Недоліком ПМ є неминучий розкид властивостей виробів у межах однієї партії [1]. Більше того, в результаті особливостей технологічних процесів і недосконалості технологічного устаткування можливий розкид властивостей порошкового матеріалу в об'ємі окремого зразку або виробу [2].

Для контролю фізико-механічних характеристик виробів ПМ широке застосування знаходять структурночутливі акустичні методи. На сьогоднішній день існує достатня кількість емпіричних детермінованих залежностей, які пов'язують деякі параметри фізико-механічних характеристик виробів ПМ з вимірюваними параметрами ультразвукового контролю [3]. Проте можна зауважити, що на результат ультразвукового контролю виробів ПМ впливає значна кількість випадкових факторів (наприклад, розкид властивостей порошкового матеріалу в об'ємі окремого виробу, складна геометрична форма самого виробу, виникнення похибок в процесі вимірювання тощо), що обумовлюють стохастичну природу отриманих даних.

Метою роботи є розробка стохастичної моделі процесу ультразвукового неруйнівного контролю фізико-механічних характеристик (зокрема, пористості) виробів ПМ.

Постановка задачі. Одним з основних параметрів, який обумовлює фізико-механічні характеристики виробу з порошкового матеріалу є пористість, яка в загальному випадку характеризує ступінь заповнення об'єму матеріалу порами. Основним вимірювальним параметром ультразвукової структуроскопії виробів ПМ, який пов'язаний із пористістю, є швидкість поширення ультразвуку. Наявність пористості приводить до зменшення швидкості поширення ультразвуку в об'єкті контролю (ОК), при цьому згасання зростає в основному завдяки розсіюванню. Пори мають значно більший демпфуючий вплив на процеси поширення пружних коливань у твердому тілі, ніж інші недосконалість структури [4].

Більшість запропонованих детермінованих залежностей між пористістю та швидкістю ультразвуку справедливі для найпростішої моделі пористого тіла, в якій всі пори, число яких не змінюється в процесі спікання, мають сферичну форму, однакові розміри і рівномірно розподілені в об'ємі тіла. На відміну від ідеальної структури порові канали в реальних матеріалах не мають впорядкованого положення і якогонебудь визначеного напрямку. Зазвичай вони хаотично пронизують виріб з порошкового матеріалу у всіх напрямках, перетинаються один з одним та з'єднуються між собою [5]. Тому що врахувати таку хаотичну структуру практично неможливо, емпіричні залежності швидкості поширення ультразвукових коливань (УЗК) від пористості мають певні обмеження в їх застосуванні.

В загальному вигляді залежність швидкості ультразвуку від пористості описується наступним виразом:

$$C_l = C_{l0} \cdot (1 - ap)^n, \quad (1)$$

де C_{10} – швидкість поздовжньої хвилі у відсутності пористості, n – експериментально визначена константа, a – емпіричний коефіцієнт.

Строго кажучи, величину C_{10} не можна вважати швидкістю поздовжньої хвилі у відсутності пористості, тому що в виробках ПМ завжди в тій чи іншій мірі присутня пористість. Швидкість C_{10} в формулі (1) розглядатимемо як функцію багатьох параметрів: температурних режимів випалу виробів з порошкових матеріалів ($T^{\circ}C$), часових режимів випалу ($t_{\text{вип}}$), кількісного складу сировинних компонентів (N_c) та технології виготовлення (R_b):

$$C_{10} = f(T^{\circ}C, t_{\text{вип}}, N_c, R_b). \quad (2)$$

Можна припустити, що залежність швидкості C_{10} від заданих параметрів матиме випадковий характер. Виведення аналітичної детермінованої залежності для зазначених параметрів не видається можливим. Звідси виникають труднощі і з використанням детермінованого порогового значення швидкості УЗК для завдання критеріїв дефектності виробів ПМ. В такому випадку необхідно переходити до аналізу статистичних характеристик результатів ультразвукового контролю.

Розробка стохастичної моделі контролю виробів ПМ. У формулі (1) величина C_l представляє швидкість поздовжньої хвилі при наявності пористості. Припустимо, що величина C_l являє собою вимірюваний параметр, котрий визначають в процесі ультразвукового контролю виробу ПМ. Позначимо її як $C_{l\text{вим}}$. Тоді можемо вважати, що вимірне значення швидкості буде залежати від: базової швидкості у відсутності пористості C_{10} , зміни швидкості за наявності пористості $\Delta C_{l\text{пор}}$ (причому ця складова буде завжди зі знаком «-», тому що пористість призводить до зменшення швидкості поздовжньої хвилі) та сумарної похибки $\Delta C_{l\delta}$ в точці вимірювання, що виникає в процесі контролю:

$$C_{l\text{вим}} = C_{10} - \Delta C_{l\text{пор}} \pm \Delta C_{l\delta}. \quad (3)$$

В формулі (3) величини C_{10} та $\Delta C_{l\delta}$ є випадковими величинами і не мають строгих аналітичних залежностей для їх теоретичного визначення.

Розділимо чинники, що впливають на результат ультразвукового контролю виробів ПМ на дві групи: технологічні та вимірювальні (рис.1).

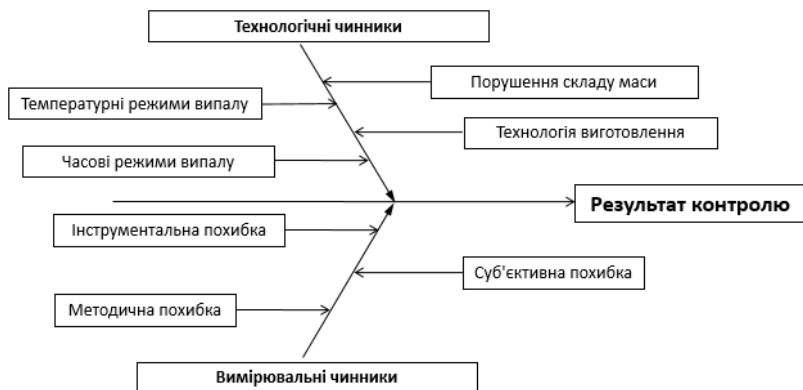


Рис. 1 – Групи чинників, що впливають на результат контролю виробів ПМ

Технологічні чинники впливають глобально на формування результату вимірювання швидкості поширення УЗК в виробах ПМ. Результатом впливу технологічних чинників є формування пористості, яка завжди присутня в тілі виробів ПМ. За наявності пористості на результат вимірювання швидкості УЗК впливатимуть: тип пор, їх геометрія, розмір, наявність в порах вологи і т.п. Зауважимо, що на результат вимірювань впливатиме і геометричне положення перетворювача на поверхні виробу, особливо якщо останній має округлу форму. Вимірювальні чинники впливають локально на формування результату контролю. Під локальним впливом будемо розуміти вплив в певній точці вимірювання на поверхні виробу ПМ.

Для можливості використання статистичних характеристик результатів контролю необхідно проводити багатократні вимірювання швидкості ультразвуку в окремих точках на поверхні виробу. Результат j -го вимірювання швидкості ультразвуку в i -й точці на поверхні виробу ПМ представимо у вигляді [6]:

$$C_{i,j} = C_i(Tf) \pm \Delta C \pm \varepsilon_{i,j}, \quad (4)$$

де $\varepsilon_{i,j}$ – значення сумарної випадкової похибки вимірювання в i -й точці, що характеризується середньоквадратичним відхиленням, ΔC – систематична похибка, яка виникає при калібруванні дефектоскопу, $C_i(Tf)$ – істинне значення швидкості ультразвуку, що є випадковою функцією, яка залежить від впливу технологічних факторів та пористості.

Аналіз факторів, що впливають на вірогідність ультразвукового контролю виробів ПМ, показує, що їх є значна кількість, причому вони незалежні. Згідно центральної граничної теореми теорії ймовірностей сума великого числа незалежних випадкових величин, кожна з яких не домінує над іншими, підкоряється нормальному (гаусовому) розподілу ймовірностей. Тому при побудові стохастичної моделі процесу контролю виробів ПМ робиться припущення, що закон розподілу вимірюваної величини (швидкості ультразвуку) по всьому об'єму ОК не суперечить нормальному закону розподілу.

Стохастичну модель вимірювання швидкості УЗК розглядатимемо як лінійну систему, що має породжуючий процес $\eta(\tau)$, власну імпульсну реакцію системи при наявності дефекту (пористості) $\varphi(\tau, t)$ та відгук $\zeta(t)$ при наявності дефекту (пористості). Нехай на лінійну систему з імпульсною реакцією $\varphi(\tau, t)$ діє породжуючий процес $\eta(\tau)$, що являє собою послідовність окремих імпульсів, кожен з яких характеризується ймовірнісним законом появи у часі. Породжуючий процес $\eta(\tau)$ – це процес впливу акустичного поля на ОК, який вважатимемо випадковим процесом з незалежними приростами, розподіл якого нескінченно ділений. Процес із незалежними приростами в теорії випадкових процесів – це узагальнення поняття суми незалежних випадкових величин.

Нескінченно ділені закони мають велике значення при статистичному підході до аналізу багатьох фізичних процесів. Практичний інтерес до цих розподілів викликаний ще й тим, що вони дозволяють вивчати фізичні випадкові величини та процеси, що представляють собою суми випадкових величин (або процесів), які задовольняють умовам граничної нехтуваності. При цьому закони розподілу окремих доданків, які можуть бути довільними, не розглядають, обмежуючись лише дослідженням безмежно ділених законів, що в ряді випадків значно спрощує рішення прикладних задач.

Важлива властивість безмежно ділених законів розподілу полягає в тому, що для них можна писати в загальному виді характеристичну функцію, іменовану канонічною формою. Логарифм такої функції використовується в трьох різновидах: форма Колмогорова, форма Леві-Хінчина і форма Леві. Ці форми охоплюють гаусів і пуассонівський закони розподілу, а також χ^2 розподіл, логарифмічно нормальний, Максвелла та ін. [7]

Отже, запишемо породжуючий процес у вигляді послідовності випадкових незалежних імпульсів, що виникають у випадкові моменти часу τ_i (моменти випромінювання зондуючого імпульсу), які задовольняють умові незалежності приростів на інтервалах часу, що не перетинаються:

$$\Delta\eta(\tau_j) = \eta(\tau_{j+1}) - \eta(\tau_j), \quad (5)$$

де $j=1,2,3,\dots,n$.

Тоді породжуючий процес у довільний момент поточного часу t можна розглядати як:

$$\eta(t) = \sum_{\tau_j} \Delta\eta(\tau_j), \quad 0 \leq \tau_j \leq t. \quad (6)$$

Приріст процесу $\Delta\eta(\tau)$ будемо розглядати, як вплив на лінійну систему з імпульсною передатною характеристикою $\varphi(\tau, t)$.

Відгук $\zeta(t)$ такої системи в даному випадку являє собою інтеграл Дюамеля по випадковій функції і також описується лінійним випадковим процесом, інтегральне зображення якого [8]:

$$\zeta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) d\eta(\tau), \quad t \in T^*, \quad (7)$$

де $\{\eta(\tau), \tau \in (-\infty; \infty), \eta(0)=0\}$ – випадковий процес з незалежними приростами, точки росту якого співпадають з моментами виникнення окремих імпульсів;

$\varphi(\tau, t)$ – ядро інтегрального зображення, невідповідна інтегрована в квадраті функція, що задовольняє умові фізичної реалізованості: $\varphi(\tau, t) \equiv 0$ при $t < \tau, \tau \in [0; \infty)$;

T^* – область завдання процесу, яка може бути як неперервним інтервалом, так і дискретною множиною точок.

Процес $\zeta(t)$ – це процес на прийомному перетворювачі. Вихідний процес $\zeta(t)$ повинен задовольняти умові фізичної реалізованості:

$$M(\zeta(t))^2 < \infty. \quad (8)$$

Тобто дисперсія приростів процесу $\eta(\tau)$ повинна бути кінцевою. Цій умові відповідає клас Гільбертових лінійних випадкових процесів [9].

Якщо породжуючий процес $\eta(\tau)$, що входить у формулу (7), є однорідним стохастичним неперервним процесом з незалежними приростами, то можна визначити характеристичну функцію процесу $\zeta(t)$, яка являє собою перетворення Фур'є щільності розподілу, і тому з неї можна отримати всі необхідні характеристики вихідного процесу. Характеристична функція дозволяє проводити розрахунки, оперуючи тільки параметрами ядра інтегрального зображення вихідного процесу, яке є невідповідною функцією, що значно спрощує процес обчислень.

Породжуючий процес $\eta(\tau)$ – гаусовий процес. Тому що ядро інтегрального зображення $\varphi(\tau, t)$ є лінійним (а отже, не змінює закон розподілу породжуючого процесу), то відгук системи $\zeta(t)$ також являтиме

гаусів процес, для опису якого достатньо знати два параметри – математичне сподівання та дисперсію:

$$M\zeta(t) = M\eta(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) d\tau ; \quad (9)$$

$$D\zeta(t) = D\eta(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} \varphi^2(\tau, t) d\tau , \quad (10)$$

де $M\eta(\tau)$, $D\eta(\tau)$ – відповідно математичне сподівання та дисперсія вхідного процесу.

При застосуванні вищенаведеної моделі для опису процесу неруйнівного контролю виробів ПМ, параметри ядра процесу $\varphi(\tau, t)$ визначаються фізико-механічними характеристиками, на які впливає пористість. При зміні ядра інтегрального зображення $\varphi(\tau, t)$ буде змінюватись математичне сподівання та дисперсія вихідного процесу, тобто матиме місце певний систематичний зсув та зміна розкиду значень вимірюваної величини.

Ядро інтегрального зображення $\varphi(\tau, t)$ дозволяє лише виділити інформативні параметри, тому що має загальний вигляд. Надалі необхідно побудувати просту модель, в якій використовувались би визначені коефіцієнти для її опису. Найпростішим способом математичного опису системи з невідомим коефіцієнтом передачі є лінеаризація передатної характеристики системи.

Вважатимемо, що лінійна передатна характеристика системи не змінює закон розподілу вихідної величини по відношенню до вхідної. Враховуючи, що в результаті контролю вимірюється швидкість поширення УЗК в матеріалі виробу ПМ, опишемо модель процесу контролю відносно даного параметру. Позначимо швидкість УЗК в безпористому зразку як $C_{\text{бп}}$, а швидкість у зразку з пористістю як $C_{\text{п}}$. Тоді зв'язок між оцінками математичного сподівання та дисперсії з урахуванням побудованої лінійної моделі процесу контролю виробів ПМ виражається наступним чином:

$$MC_{\text{п}} = A_0 - A_1 \cdot MC_{\text{бп}} ; \quad (11)$$

$$DC_{\text{п}} = B_0 + B_1 \cdot DC_{\text{бп}} , \quad (12)$$

де A_0 – швидкість, обумовлена фізико-механічними характеристиками виробу, A_1 – коефіцієнт, обумовлений пористістю, B_0 – дисперсія швидкості УЗК, яка визначається анізотропією матеріалу, B_1 – коефіцієнт, що визначається просторовим положенням пористості в об'ємі матеріалу.

Знак «-» у формулі (11) обумовлений тим, що пористість приводить до зменшення швидкості поширення УЗК.

Таким чином, при наявності пористості, змінюватимуться коефіцієнти перетворення по математичному сподіванню та дисперсії A_0, A_1, B_0, B_1 . Ці експериментально-теоретичні коефіцієнти нам невідомі. Визначити їх можна, лише побудувавши регресійну модель на основі експериментальних даних. Для проведення регресійного аналізу, поперше, необхідно виготовити зразки тестових виробів ПМ з різними фізико-механічними властивостями і визначити коефіцієнти передачі по математичному сподіванню та дисперсії у відсутності пористості. Після цього необхідно визначити коефіцієнти передачі для зразків з різною пористістю, використовуючи спеціальні тестові сигнали. В такому випадку матимемо можливість вимірювати кількісне значення пористості. Однак, в силу впливу специфічних факторів на процес виготовлення виробів ПМ практично неможливо виготовити необхідні зразки для побудови регресійної моделі. Іншим підходом до вирішення поставленої задачі є застосування дисперсійного аналізу результатів контролю виробів ПМ, за яким відбувається класифікація дефектного та бездефектного стану виробу.

Висновки. Таким чином, в результаті теоретичних досліджень побудована стохастична модель процесу ультразвукового контролю виробів ПМ на основі лінійних випадкових процесів, що дозволяє обґрунтувати застосування статистичної обробки інформативного параметру, яким є швидкість поширення ультразвуку, та статистичних критеріїв при розробці адаптивного порогу, за яким приймається рішення про дефектність виробу. Класифікація технічного стану виробу ґрунтується на аналізі зміни математичного сподівання та дисперсії вибірок вимірних значень швидкості ультразвуку. На основі розробленої стохастичної моделі планується створення алгоритмічного та програмного забезпечення, що дозволить реалізувати запропонований підхід в реальному зразку засобу ультразвукової структуроскопії виробів ПМ.

Список літератури: 1. Роман О.В. Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии / О.В. Роман, В.В. Скороход, Г.Р. Фридман. – Мн.: Вышш. шк., 1989. – 182 с. 2. Федорченко И.М. Основы порошковой металлургии / И.М. Федорченко, Р.А. Андриевский. – К.: АН УССР, 1963. – 420 с. 3. Балдев Р. Применения ультразвука / Р. Балдев, В. Раджендран, П. Паланичами. – М.: Техносфера, 2006. – 576 с. 4. Черемской П.Г. Поры в твердом теле / П.Г. Черемской, В.В. Слезов, В.И. Бетехтин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 376 с. 5. Беркман А.С. Пористая проницаемая керамика / А.С. Беркман. – М.: Госстройиздат, 1959. – 173 с. 6. Єременко В.С. Шляхи мінімізації сумарної похибки вимірювання швидкості ультразвуку в матеріалах з неоднорідною структурою / В.С. Єременко, Р.М. Галаган // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. – Одеса. – 2012. - № 06 (82). – С. 39-45. 7. Марченко Б.Г. Вибродиаг-

ностика подшипниковых узлов электрических машин / Б.Г. Марченко, М.В. Мыслович. – К.: Наукова думка, 1992. – 196 с. **8.** Марченко Б.Г. Метод стохастических интегральных представлений и его приложения в радиотехнике / Б.Г. Марченко. – К.: Наукова думка, 1973. – 191 с. **9.** Коваленко И.Н. Случайные процессы: Справочник / И.Н. Коваленко, Н.Ю. Кузнецов, В.М. Щуренков. – К.: Наукова думка, 1983. – 366 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Roman, O.V., Skorohod, V.V., Fridman, G.R. *Ul'trazvukovoj i rezistometricheskij kontrol' v poroshkovej metallurgii*. Minsk: Vysshaja shkola, 1989. Print. **2.** Fedorchenko, I.M., Andrievskij, R.A. *Osnovy poroshkovej metallurgii*. Kyiv: AN USSR, 1963. Print. **3.** Baldev R., Radzhendran V., Palanichami P. *Primenenie ul'trazvuka*. Moscow: Tehnosfera, 2006. Print. **4.** Cheremskoj, P.G., Slezov, V.V., Betehtin, V.I. *Pory v tverdom tele*. Moscow: Jenergoatomizdat, 1990. Print. **5.** Berkman, A.S. *Poristaja pronicaemaja keramika*. Moscow: Gosstrojizdat, 1959. Print. **6.** Eremenko, V.S., Galagan, R.M. "Ways to minimize the total error of ultrasonic velocity measurements in materials with heterogeneous structure". *Electrotechnical and Computer Systems* 06 (82) (2012): 39-45. Print. **7.** Marchenko, B.G. Myslovich, M.V. *Vibrodiagnostika podshipnikovyh uzlov jelektricheskikh mashin*. Kyiv: Naukova dumka, 1992. Print. **8.** Marchenko, B.G. *Metod stohasticheskikh integral'nyh predstavlenij i ego prilozhenija v radiotehnike*. Kyiv: Naukova dumka, 1973. Print. **9.** Kovalenko, I.N., Kuznecov, N.Ju., Shhurenkov, V.M. *Sluchajnye processy: Spravochnik*. Kyiv: Naukova dumka, 1983. Print.

Надійшла (received) 30.04.2014