

УДК 621.317

## ВИЗНАЧЕННЯ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛУ МЕТОДАМИ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТОМОГРАФІЇ

© Назарчук З. Т., Кошовий В. В., Кривін Є. В., Романишин І. М., 2000  
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів

*Для оцінки переддефектного стану матеріалу і прогнозування розвитку сформованих дефектів необхідна інформація про просторовий розподіл (ПР) фізико-механічних характеристик (ФМХ) матеріалу. Для визначення ПР ФМХ матеріалів в переддефектному стані застосовують методи ультразвукової томографії. Розроблені принципи побудови методів ультразвукової томографії для неруйнівного контролю, які забезпечують високу продуктивність контролю та універсальність томографічних систем щодо форми контролюваного виробу. На основі цих принципів розроблені методи 2D-реконструкції скалярних характеристик, 3D-реконструкції скалярних характеристик у товстостінному виробі у випадку дзеркально-тіньового збору даних в конусі при одноракурсному озвученні та метод відновлення характеристик тензорного поля напружень.*

Для оцінки переддефектного стану матеріалу і прогнозування розвитку вже сформованих дефектів необхідна інформація про його фізико-механічні характеристики (ФМХ). На практиці поширені випадки, коли ФМХ матеріалу змінюються по об'єму виробу. Просторові зміни ФМХ матеріалу виникають внаслідок дії агресивного середовища і експлуатаційних навантажень в обладнанні хімічного виробництва, теплових і атомних електростанцій, нафто- і газопроводах тощо. Просторово-неоднорідний розподіл в об'ємі виробу характерний також для залишкових і наведених напружень.

Необхідну для діагностики виробу інформацію про ПР ФМХ матеріалу можна отримати за допомогою ультразвукової комп'ютерної томографії (КТ), використовуючи зв'язки між ФМХ матеріалу і його акустичними характеристиками. Методи ультразвукової КТ для відновлення ПР ФМХ матеріалу можна розбити на дві групи - методи відновлення ПР скалярних і тензорних характеристик. До відновлення ПР скалярних характеристик відносяться задачі визначення ПР пружних, міцнісних, структурних і технологічних характеристик неоднорідного ізотропного середовища. Тензорний характер необхідно враховувати при відновленні поля напружень, а також вже перерахованих характеристик анізотропного середовища.

Особливості відновлення ПР ФМХ матеріалу

пов'язані з тим, що можливі зміни ФМХ відповідають незначним змінам акустичних характеристик. Це означає, що справедливим є допущення, що ультразвукові хвилі поширюються вздовж прямолінійної траєкторії і для відновлення КТ акустичних характеристик можуть бути використані підходи, розроблені для трансмісійної КТ [1].

Використання томографічних методів в ультразвуковому неруйнівному контролі (НК) має свої особливості, які необхідно враховувати при розробці методів КТ. При зборі даних треба забезпечувати акустичний контакт між поверхнею виробу і перетворювачами. Тому можливі схеми збору даних визначаються формою виробу. Найбільш розвинені методи КТ на основі паралельної і віялоподібної схеми збору даних не забезпечують універсальності в ультразвуковому НК.

Друга особливість пов'язана з продуктивністю томографічних систем. У методах КТ, які знайшли найбільше застосування, на першому етапі відновлення проводиться фільтрація проєкцій, а зображення будується тільки на кінцевому етапі. В ультразвуковому НК неоднорідності, які представляють інтерес для діагностики, зустрічаються досить рідко і тому такий підхід до відновлення не забезпечує високої продуктивності.

Для забезпечення універсальності і продуктивності в ультразвуковому НК у всіх запропонованих в

роботі методах КТ закладений наступний підхід:

1) початковими даними для відновлення є результати вимірювань вздовж променя тінювим або дзеркально-тінювим методом (променеві проекції), що дозволяє використати методи КТ для НК виробів різної форми;

2) на першому етапі відновлення виконується операція оберненого проектування і отримане зображення (сумарне) використовується для пошуку неоднорідностей;

3) відновлення шуканої функції здійснюється фільтрацією сумарного зображення з використанням операцій прямого і оберненого проектування.

**Методи відновлення ПР скалярних характеристик.** Задачі відновлення ПР ФМХ матеріалу можна розділити на дві групи. Перша група - це двовимірні задачі, до яких можна віднести відновлення ПР ФМХ матеріалу в тонколистових виробах або в поверхневому шарі на основі зв'язків між ними і параметрами ультразвукових хвиль Лемба або поверхневих хвиль. До них відносяться задачі оцінки якості термохімічної обробки поверхні металевих виробів, визначення адгезійної міцності захисних покриттів та інших.

Друга група - це тривимірні задачі, до яких можна віднести відновлення ПР ФМХ в об'ємі виробу. Інформація може бути представлена у вигляді тривимірних зображень, зображень окремих перетинів або у вигляді ортографічних зображень.

Відновлення ПР швидкостей поширення (кофіцієнта поглинання) проводиться на основі променевих проекційних даних, які вимірюються при різних ракурсах озвучення виробу. Проекційні дані можна представити у вигляді:

$$f(\bar{r}, \bar{m}) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\bar{r} + \bar{m}t) dt, \quad (1)$$

де  $f(\bar{r}, \bar{m})$  - час поширення (амплітуда) ультразвукової хвилі через точку  $\bar{r}$  в напрямку, який визначається ортом  $\bar{m}$ ;  $g(\bar{r})$  - шуканий розподіл.

Відновлення двовимірних розподілів складається з двох етапів. На першому етапі на основі вимірних проекційних даних (1) шляхом оберненого проектування будеється сумарне зображення (СЗ):

$$b(\bar{r}) = \hat{B}_2 \{f(\bar{r}, \bar{m})\} = \int_0^{\pi} f(\bar{r}, \bar{m}) d\varphi. \quad (2)$$

Ця операція здійснюється в процесі збору даних і дозволяє вирішувати задачу пошуку і локалізації просторових неоднорідностей у виробі.

При виявленні неоднорідностей акустичних властивостей матеріалу проводиться другий етап відновлення - із СЗ (2) відновлюється шуканий розподіл  $g(\bar{r})$ .

Для цього проводиться проектування СЗ (2) у вигляді паралельних проекцій

$$\begin{aligned} \psi(s, \varphi) &= \hat{B}_2^{-1} \{b(\bar{r})\} = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} b(x, y) \delta(s - x \cos \varphi - y \sin \varphi) dx dy \end{aligned} \quad (3)$$

і фільтрація їх шляхом подвійного диференціювання

$$\psi''(s, \varphi) = -\frac{1}{4\pi^2} \frac{\partial^2}{\partial s^2} [\psi(s, \varphi)]. \quad (4)$$

Виконуючи далі операцію оберненого проектування над фільтрованими проекціями (3), (4), отримуємо шукану функцію

$$g(x, y) = \hat{B}_2 \{\psi''(s, \varphi)\} = \int_0^{\pi} \psi''(x \cos \varphi + y \sin \varphi, \varphi) d\varphi. \quad (5)$$

Приклад двовимірного розподілу для зміни твердості в поверхневому шарі в сталій пластині товщиною 26 мм, де структурні зміни виникли внаслідок місцевого нагріву струмами високої частоти, показаний на рис. 1.

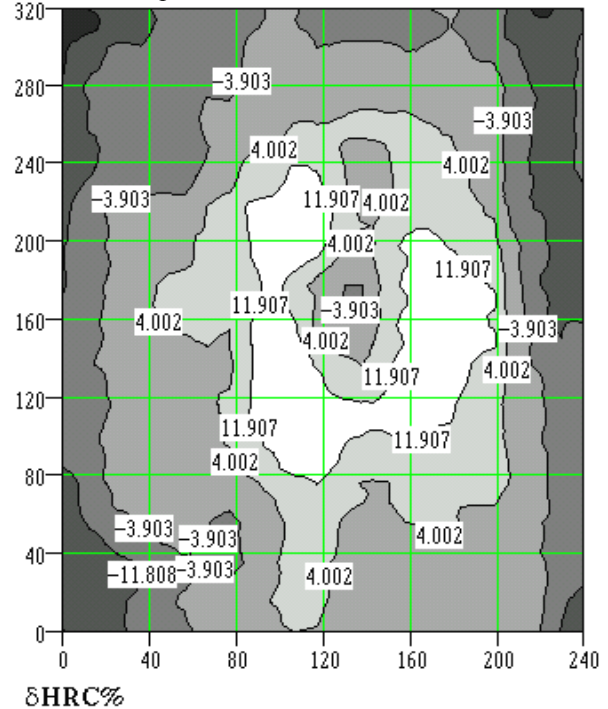


Рис. 1. Експериментально отримане томографічне зображення твердості в поверхневому шарі сталі з штучно наведеною неоднорідністю.

Твердість визначалася на основі відновленого розподілу по поверхні пластини швидкості поширення хвиль Релея і експериментально встановленої залежності між ними.

**Відновлення тривимірних розподілів.** Форма виробу в ультразвуковому НК впливає на схему збору даних і на метод відновлення. Розглянемо випа-

док відновлення ПР акустичних характеристик матеріалу в об'ємі товстостінних виробів. Особливості відновлення в цьому випадку полягають в тому, що не можливо забезпечити повноту збору проєкційних даних (повний ракурс огляду), внаслідок чого відновлення шуканого розподілу можливе тільки з деякими похибками. Найбільш оптимальною є схема збору даних в конусі з одноракурсним озвученням. Результат оберненого проєктування в конусі можна представити в наступному вигляді:

$$b(x, y, z) = g(x, y, z) \otimes \otimes \otimes \frac{\delta\left(z \sin \theta_0 - \sqrt{x^2 + y^2} \cos \theta_0\right)}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}. \quad (7)$$

Простіше проаналізувати цей зв'язок в області просторових частот, тобто

$$B(u, v, w) = G(u, v, w) \cdot \begin{cases} \frac{4\pi}{\sqrt{u^2 + v^2 - w^2 \operatorname{tg}^2 \gamma_0}}, & |w \cdot \operatorname{tg} \gamma_0| < \sqrt{u^2 + v^2} \\ 0, & |w \cdot \operatorname{tg} \gamma_0| > \sqrt{u^2 + v^2} \end{cases}, \quad (8)$$

де  $\gamma_0 = \pi/2 - \theta_0$ .

Як видно з (8), СЗ є низькочастотним образом шуканого розподілу і може використовуватися для вирішення задач пошуку і локалізації неоднорідностей в об'ємі виробу. СЗ не містить інформацію про просторові частоти шуканого розподілу, які знаходяться в конусі, обмеженому кутом  $\gamma_0$ , і з нього можна відновити тільки функцію  $g^*(x, y, z)$ , Фур'є-образ якої зв'язаний з шуканим розподілом наступним чином:

$$G^*(u, v, w) = \begin{cases} G(u, v, w), & |w \cdot \operatorname{tg} \gamma_0| < \sqrt{u^2 + v^2} \\ 0, & |w \cdot \operatorname{tg} \gamma_0| > \sqrt{u^2 + v^2} \end{cases}. \quad (9)$$

Функція  $g^*(x, y, z)$  з деякими спотвореннями відновлює шуканий розподіл вздовж товщини листа.

Спотворення зменшуються при збільшенні кута вводу ультразвукових хвиль. З (8) можна отримати вираз для визначення  $g^*(\bar{r})$  з використанням тривимірних Фур'є-перетворень:

$$g^*(\bar{r}) = \frac{1}{4\pi} \bar{F}_3^{-1} \left\{ \bar{F}_3 \{b(\bar{r})\} \cdot \sqrt{u^2 + v^2 - w^2 \operatorname{tg}^2 \gamma_0} \right\}. \quad (10)$$

При відновленні низькочастотних розподілів меншої кількості обчислень використовується такий вираз, який отриманий на основі операції оберненого проєктування:

$$g^*(\bar{r}) = -\frac{1}{4\pi^2} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} - c \operatorname{tg}^2 \theta_0 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \bar{K}_3^{\theta_0} \{b(\bar{r})\}. \quad (11)$$

Приклад тривимірного відновлення ПР ФМХ приведений на рис. 2. Для експериментальних досліджень був вибраний сталевий лист товщиною 28 мм із стиковим зварним з'єднанням. Збір даних про-

$$b(\bar{r}) = \bar{K}_3^{\theta_0} \{g(\bar{r})\} = \int_{2\pi} d\Omega \int_{-\infty}^{\infty} g(\bar{r} + \bar{m}k) \delta(\bar{m}\bar{n}_{\theta_0}) dk, \quad (6)$$

де  $\bar{n}_{\theta_0} = (-\cos \varphi \cos \theta_0, -\sin \varphi \cos \theta_0, \sin \theta_0)^T$  - орт, перпендикулярний конусу с кутом  $\theta_0$ , утвореним променями, які проходять через точку  $\bar{r}$ .

З (6) слідує, що зв'язок СЗ із шуканим розподілом має вигляд тривимірної згортки, а саме

водився дзеркально-тіньовим методом із застосуванням конусної схеми при одноракурсному озвученні.

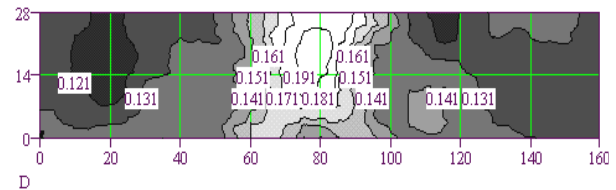


Рис. 2. Експериментально отримане томографічне зображення просторового розподілу розміру зерна в перерізі, перпендикулярному поверхні пластини і зварному з'єднанню.

На рис. 2 приведено розподіл розміру зерна (в мм) в перерізі, перпендикулярному поверхні пластини і зварному з'єднанню, який отриманий з відновленого розподілу коефіцієнта поглинання повздовжньої ультразвукової хвилі в об'ємі листа.

**Метод відновлення ПР характеристик поля напружень.** Розподіл напружень в об'ємі виробу є однією з найважливіших характеристик, яка визначає переддефектний стан матеріалу.

Акустодіагностика напружено-деформованого стану (НДС) матеріалу базується на ефекті акустопружності. Для інженерних розрахунків найбільш зручна матрична теорія акустопружності [2], в якій використовують коефіцієнти, які визначаються експериментально при одновісному НДС на основі вимірювань відносних змін часів поширення ультразвукових хвиль. Вимірювання проводяться для повздовжніх і двох поперечних хвиль, які поширюються і поляризовані вздовж осей вибраної системи

координат. При одновісному напруженні в напрямку осі  $Z$  внаслідок симетрії є чотири незалежних коефіцієнти  $\alpha_{xx}, \alpha_{zz}, \alpha_{xy}, \alpha_{xz}$ , де індекси відповідають напрямку поширення і поляризації ультразвукових хвиль.

До задачі відновлення ПР характеристик НДС методами ультразвукової КТ можливі різні підходи. Один з них базується на відновленні ПР компонент тензора напружень [3]. Можливий інший підхід на основі того, що характеристики НДС в більшості випадків не залежать від вибору системи координат. Їх можна визначити через інваріанти тензора напружень.

Відновлення інваріантів в деяких випадках можна звести до задачі відновлення ПР скалярних величин, яка вимагає значно меншої кількості розрахунків в порівнянні з відновленням ПР компонент тензора напружень.

Метод визначення ПР першого інваріанту базується на тому, що на основі результатів вимірювань відносних змін часів поширення повздовжньої  $\tilde{\tau}_{xx}$  і поперечних ультразвукових хвиль із взаємно перпендикулярною поляризацією  $\tilde{\tau}_{xy}, \tilde{\tau}_{xz}$  формується променева проекція інваріанту.

Інваріант є скалярною величиною і його ПР можна відновлювати методами для скалярних величин. Променева проекція першого інваріанту  $J_1(\bar{r}, \bar{m})$  може бути отримана на основі результатів вимірювань наступним чином:

$$J_1(\bar{r}, \bar{m}) = \frac{1}{K} [\tilde{\tau}_{xx}(\alpha_{xz} - \alpha_{xy}) - (\tilde{\tau}_{xy} + \tilde{\tau}_{xz})(\alpha_{xx} - \alpha_{zz})], \quad (12)$$

де  $K = \alpha_{zz}(\alpha_{xz} + \alpha_{xy}) - 2\alpha_{xx}\alpha_{xz}$ .

**Висновки.** Ультразвукова комп'ютерна томографія відкриває нові можливості визначення в об'ємі виробу ФМХ матеріалу, що дозволяє неруйнівним методом дослідити просторову неоднорідність структури і внутрішні напруження. В результаті приведених вище досліджень сформульовані підходи до розробки методів КТ, що забезпечують їм універсальність і продуктивність в ультразвуковому НК, описані методи відновлення двовимірних і тривимірних розподілів скалярних величин і характеристик поля напружень.

Експериментальні дослідження по відновленню ПР ФМХ, проведені на сталених зразках листової форми, показали стійкість томографічних методів до похибок вимірювань, що дозволило відновити слабконтрастні розподіли акустичних характеристик, викликані змінами структури матеріалу.

1. Троїцький И. Н. *Статистическая теория томографии*. - М.: Радио и связь, 1989.-240 с.
2. Бобренко В. М., Вангели М. С., Куценко А. Н. *Акустическая тензометрия*. - Кишинев: Штиинца, 1991.-204 с.
3. Koshovy V., Krivin D., Krivin E., Romanyshyn I. *Tomographic restoring of tensor stress field // Proc. of the 2nd International Conference on Computer Methods and Inverse Problems in Nondestructive Testing and Diagnostics, Minsk, 20-23 Oct., 1998, - P.273-278.*