

ДО ПРОБЛЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТОВСТОЛИСТОВИХ ВИРОБІВ МЕТОДОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОМОГРАФІЇ

*В.В.Кошовий, Є.В.Кривін, В.П.Курій, О.Є.Левіцький, І.М.Романишин,
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України*

79601, м. Львів, МСП, вул. Наукова, 5

тел: (0322) 637-218, електронна пошта: Koshovy@ah.ipm.lviv.ua

Розглядається принцип і метод ультразвукової реконструктивної томографії для відновлення просторового розподілу фізико-механічних характеристик матеріалу (ПР ФМХ) в товстолистових виробках при односторонньому їх прозвучуванні дзеркально-тіньовим методом стосовно задачі технічної діагностики якості зварного з'єднання та матеріалу в його околі.

ВСТУП

Підвищення рівня технічної діагностики (ТД) вимагає не тільки визначення дефектності виробу, але і оцінки переддефектного стану. Для оцінки переддефектного стану виробу необхідна інформація про просторовий розподіл (ПР) фізико-механічних характеристик (ФМХ) і параметрів напружено-деформованого стану (НДС). Один з ефективних методів експериментального визначення ПР ФМХ і параметрів НДС полягає в застосуванні ультразвукової томографії [1].

Аналіз стану неруйнівного контролю (НК) і ТД виробів дозволив зупинитись на необхідності контролю товстолистових виробів при односторонньому доступі, які на даний час є найбільш актуальними в багатьох галузях науки і техніки. Приведені далі результати теоретичних досліджень, чисельного моделювання та експериментальних досліджень свідчать про те, що найбільш підходящими об'єктами для НК запропонованими томографічними методами є зварні з'єднання, які мають достатньо високочастотний характер розподілу ФМХ матеріалу в площині виробу (ХОУ). Задача експериментального визначення ПР ФМХ матеріалу та параметрів НДС у виробках із зварними з'єднаннями на даний час далека від задовільного рішення і є актуальною, особливо враховуючи суттєвий неоднорідний розподіл параметрів ФМХ у зварному з'єднанні.

В роботі задача експериментального визначення ПР ФМХ матеріалу розв'язується шляхом побудови томографічних зображень ПР акустичних характеристик - швидкостей поширення та загасання різних типів УЗ хвиль (повздовжніх, поперечних, поверхневих) та обчислення на основі цього ФМХ

матеріалу (пружних, міцнісних, структурних, технологічних, а також параметрів НДС). ПР акустичних характеристик матеріалу в переддефектному стані є слабоконтрастним, тому можна обмежитись наближенням геометричної акустики при визначенні шляху поширення сигналу.

Особливості УЗ контролю, пов'язані з труднощами забезпечення акустичного контакту, не дозволяють використати ефективні алгоритми томографічного відновлення, розроблені в рентгенівській томографії. Для забезпечення високої продуктивності контролю та універсальності щодо форми контрольованого виробу розроблені принципи побудови томографічних методів і систем в ультразвуковому НК, які полягають в наступному:

- збір проєкційних даних проводиться променевими проєкціями;
- томографічне відтворення проводиться методом оберненого проєктування і побудови сумарного зображення (СЗ), яке будується в процесі збору даних і служить пошуковим для швидкого визначення аномальних областей, що будуть підлягати більш детальному дослідженні на наступних етапах;
- побудова шуканого ПР здійснюється шляхом прямого і оберненого проєктування СЗ та фільтрації проєкцій СЗ.

Одним з методів ультразвукового контролю листових виробів при односторонньому доступі є дзеркально-тіньовий метод (ДТМ). Для дзеркально-тіньового методу характерна обмеженість ракурсу збору даних. В літературі раніше не розглядалися можливості ДТМ в задачах томографічного відновлення. В даній роботі такий розгляд приведений.

1. ТЕОРЕТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ.

Ефективність роботи томографічної системи та алгоритмів відновлення визначаються схемою збору даних.

При односторонньому доступі збір проєкційних даних (прозвучування) в кожній точці скануючої поверхні листового виробу можна здійснювати за

різними схемами: із зміною напрямів зондування по азимутальному куту (φ) та ракурсу (θ), а також при їх комбінації. Подальший теоретичний аналіз, чисельне моделювання та експериментальна апробація підтвердили оптимальність одноракурсної схеми збору даних в конусі.

На основі проєкційної теореми проведено аналіз можливостей одноракурсної схеми збору даних в конусі. Отримано, що при такому зборі даних відсутні просторові спектральні складові, що належать конусу з просторовим кутом при вершині $\pi/2-\theta$.

З проєкційної теореми слідує, що найбільше інформації міститься при найбільшому ракурсі збору даних. Отже, можна обмежитися одним ракурсом збору даних. Після вибору схеми збору даних головною задачею стає отримання співвідношення між шуканим ПР та відновлюваним згідно вибраної схеми збору даних.

Сумарне зображення, яке в загальному вигляді записується як

$$b(\vec{r}) = \hat{K}_3^{\theta_0} \{g(\vec{r})\} = \int_{-\infty(2\pi)}^{\infty} \int g(\vec{r} + \vec{m}k) \delta(\vec{m} \cdot \vec{n}_{\theta_0}) d\Omega dk$$

можна представити у вигляді:

$$b(x, y, z) = g(x, y, z) *** \frac{\delta(z \sin \theta_0 - \cos \theta_0 \sqrt{x^2 + y^2})}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \quad (1)$$

де $K_3^{\theta_0}$ - оператор оберненого проєктування,

$$\vec{n}_{\theta_0} = (-\cos \varphi \cos \theta_0, -\sin \varphi \cos \theta_0, \sin \theta_0)^T, \\ g(\vec{r}) - \text{ПР неоднорідності.}$$

Отримати формули інверсії можна досить легко, якщо перейти в спектральну область. Згідно співвідношення (1) отримуємо:

$$B(u, v, w) = G(u, v, w) x \begin{cases} \frac{4\pi}{\sqrt{u^2 + v^2 - w^2 \tan^2 \gamma_0}}, & |w \tan \gamma_0| < \sqrt{u^2 + v^2}, \\ 0, & |w \tan \gamma_0| \geq \sqrt{u^2 + v^2} \end{cases} \quad (2)$$

Із (2) випливає, що можна відновити тільки функцію G^* , яка із спотвореннями відображає шукану функцію:

$$G^*(u, v, w) = \begin{cases} G(u, v, w), & |w \tan \gamma_0| < \sqrt{u^2 + v^2}, \\ 0, & |w \tan \gamma_0| \geq \sqrt{u^2 + v^2} \end{cases}$$

Звідси можна отримати:

$$g^*(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \mathfrak{F}_3^{-1} \left\{ \mathfrak{F}_3 \{b(x, y, z)\} \sqrt{u^2 + v^2 - w^2 \tan^2 \theta_0} \right\}. \quad (3)$$

Як видно із отриманого співвідношення (3), для відновлення шуканого зображення розподілу необхідно використовувати операції тримірного перетворення Фур'є, що є досить трудомікою процедурою для прикладної реалізації. Тому був розроблений більш ефективний алгоритм відновлення шуканого розподілу на основі СЗ.

Більш ефективним є застосування алгоритму відновлення ПР на основі операцій оберненого проєктування проєкцій СЗ:

$$g^*(\vec{r}) = -\frac{1}{(4\pi)^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \tan^2 \theta_0 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \hat{K}_3^{\theta_0} \{b(\vec{r})\}$$

Приведений вище алгоритм вимагає наступних обчислювальних процедур:

1. проєктування СЗ у вигляді паралельних проєкцій;
2. фільтрація отриманих проєкцій шляхом подвійного диференціювання;
3. обернене проєктування по фільтрованим проєкціям.

2. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

З метою вибору оптимального ракурсу прозвучення та дослідження можливостей розробленої системи томографічного відновлення проводилося чисельне моделювання. Досліджувався вплив на якість відновлюваного зображення величини кута ракурсу, неповноти спектрального складу та збільшення числа ракурсів прозвучування.

Чисельне моделювання підтвердило можливість обмеження прозвучування одним ракурсом. В результаті чисельного моделювання отримано, що для якісного відновлення ПР ФМХ матеріалу по товщині виробу необхідно мати достатньо високочастотний розподіл ФМХ матеріалу в площині виробу, що характерно для виробів із зварним з'єднанням. Чисельні експерименти показали, що при відновленні ФМХ матеріалу у зварних з'єднаннях можна обмежитися ракурсом прозвучування, рівним 60° .

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ АПРОБАЦІЇ.

На рис.1 приведена блок-схема УЗ томографічної системи UST-2000 збору і обробки даних.

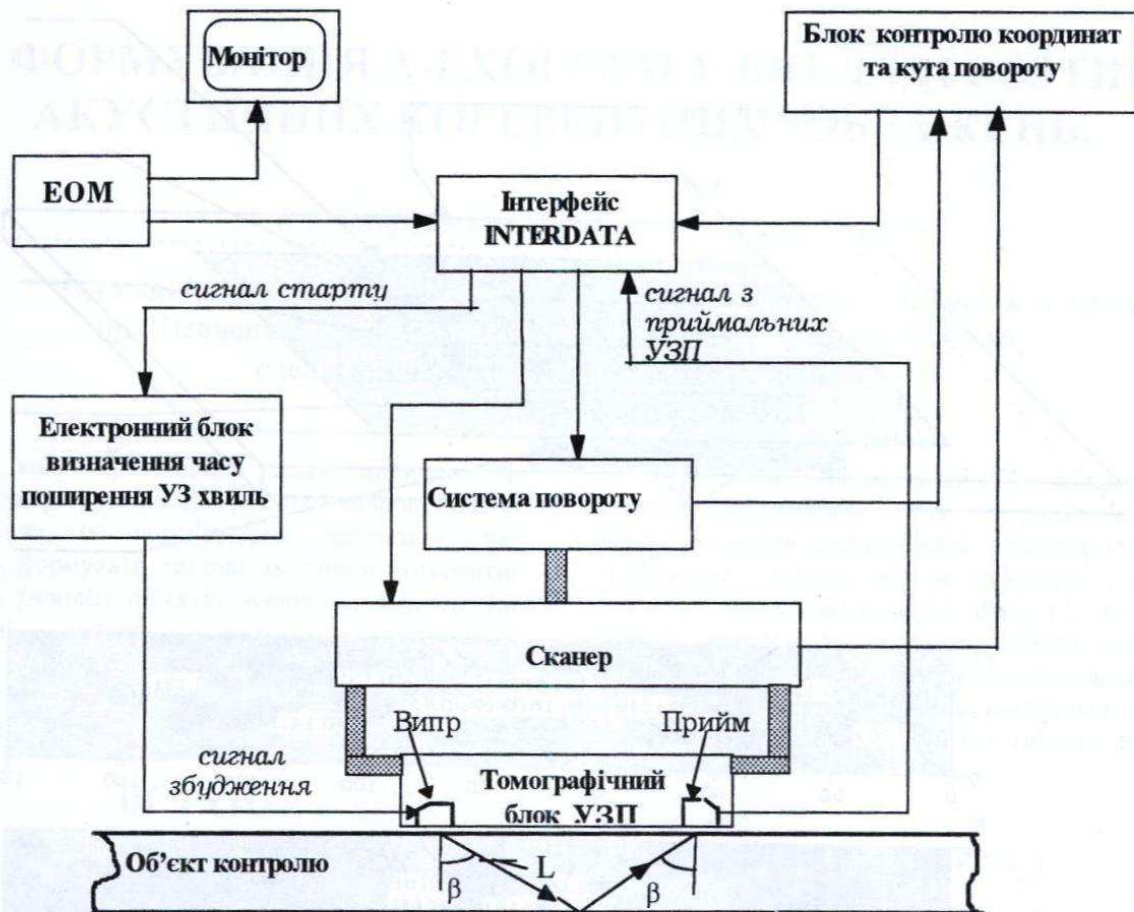


Рис. 1. Структурна схема томографічної системи UST-2000

Томографічна система включає в себе наступні основні блоки: ЕОМ з монітором, інтерфейс обміну даних та сигналів, електронний блок визначення часу поширення УЗ хвиль в об'єкті контролю, багатоканальний томографічний блок УЗ перетворювачів (УЗП), скануючий пристрій 3D-SCAN, що забезпечує сканування по поверхні об'єкту прозвучування томографічним блоком УЗП і поворот останнього на заданий кут, оптоелектронний блок контролю координат геометричного центру і кута повороту томографічного блоку УЗП в полі контролю.

На рис.2б, як ілюстрація томографічного відновлення ПР ФМХ згідно розроблених алгоритмів відновлення, представлено томографічне зображення ПР розміру зерен D (мм) вздовж шва зварного з'єднання в п'яти характерних вертикальних січеннях згідно рис.2а. Отримані зображення свідчать про високі можливості розробленої томографічної системи.

Розроблені у ФМІ НАН України томографічна система UST-2000 та прикладний пакет програм томографічної реконструкції дозволяє визначити неруйнівним методом просторовий розподіл пружних (модулі пружності), міцнісних, технологічних, структурних характеристик матеріалу та параметрів неоднорідного напружено-деформованого стану (тензор напружень та його інваріанти).

Розробка проводилась в рамках проекту УНТЦ #612/

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОМОГРАФІЧНОЇ СИСТЕМИ:

- *Метод контролю:* ультразвуковий.
- *Багато-частотне зондування:* повздовжніми, поперечними та поверхневими хвилями.
- *Метод збору даних:* дзеркально-тінювий.
- *Вимірювані параметри:* швидкість поширення ультразвукової хвилі (відносна похибка вимірювання менше $10^{-4}\%$), амплітуда.
- *Обробка сигналу:* 2D- та 3D- томографічна променева схема збору даних.
- *Відновлювані зображення:* ортографічне (усереднене по товщині); томографічне (січення довільної орієнтації).

В ультразвуковому томографі використовується універсальна система збору даних, яка забезпечує швидку переналадку на контроль виробів різноманітної форми.

Можливі області застосування: фундаментальні дослідження матеріалів, атомна енергетика, ракетно-космічна і авіаційна техніка, суднобудівництво, обладнання хімічного, нафтохімічного та газового виробництва, контроль адгезійної міцності покриттів неруйнівними методами.

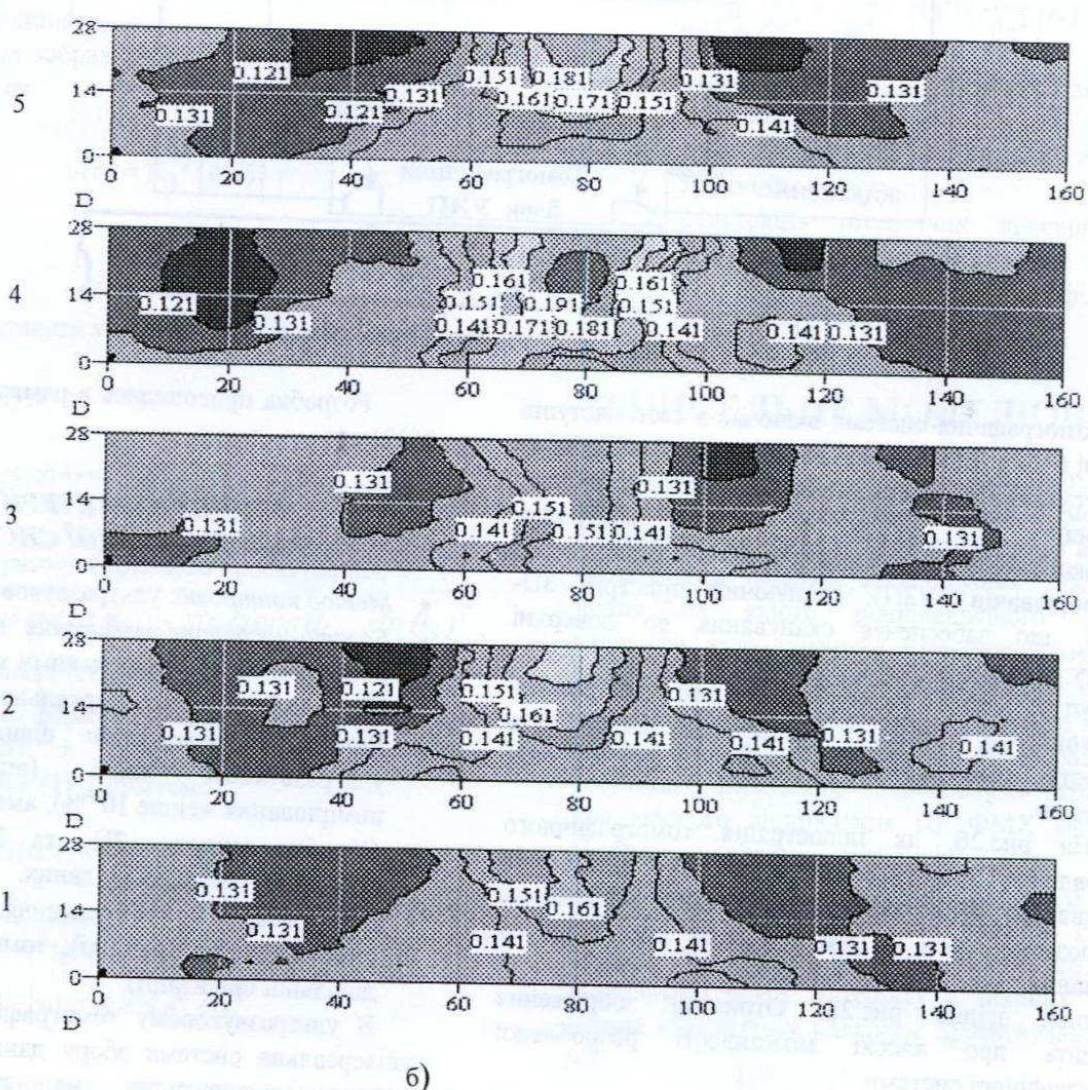
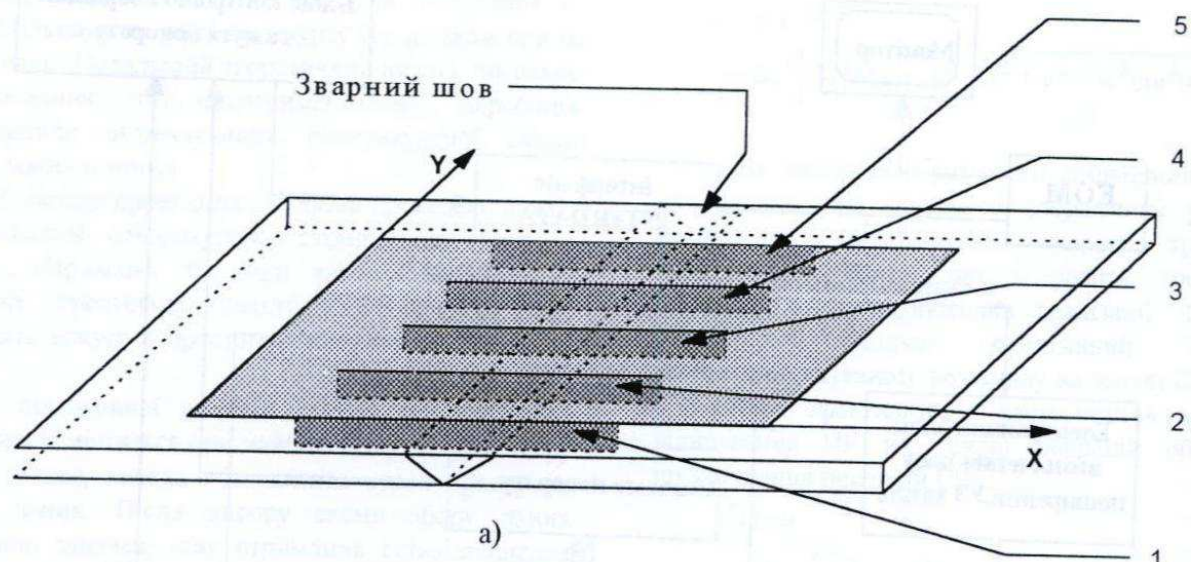


Рис.2. Відновлене томографічне зображення ПР розмірної структури зерен в різних січеннях вздовж зварного шва у виробі листової форми (крок січень 60мм)

ЛІТЕРАТУРА

1. Кошевой В.В., Кривин Е.В., Романишин И.Н

Томография листовых изделий // Дефектоскопия.- 1998, №9.-С.-20-27.