УДК 620.18

Розробка технології ультразвукової томографії для діагностики стану трубопроводів АЕС

В. В. Кошовий, І. М. Романишин, Р. І. Романишин, О. М. Мокрий, Р. В. Шарамага, А. В. Кириєнко, П. М. Семак

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

Розроблено технології ультразвукової комп'ютерної томографії для оцінки параметрів стану металу товстостінних трубопроводів АЕС. Розроблені технології реалізовано в ультразвуковому томографі на розсіяному сигналі. Вони базуються на скануванні зовнішньої поверхні трубопроводу прямим п'єзоперетворювачем, реєстрації зворотно розсіяного сигналу, томографічній реконструкції розсіювальної здатності металу, оцінці ступеня деградації в об'ємі металу на основі томографічних зображень.

Ключові слова: неруйнівний контроль, ультразвукова томографія, товстостінний трубопровід, акустико-механічні залежності, параметри стану металу, деградація, зворотно розсіяний сигнал.

Вступ. Важливою і невирішеною задачею атомної енергетики є оцінка ступеня деградації металу в об'ємі товстостінних трубопроводів АЕС неруйнівними методами. Найвразливіші місця трубопроводів – гини і зварні з'єднання [1]. У металознавстві ступінь деградації оцінюють опосередковано на основі вимірювань твердості, границь пластичності, міцності, опору крихкому руйнуванню тощо. На даний час руйнівний металографічний контроль окремих вирізок із досліджуваних об'єктів є одним із найдостовірніших.

Фахівці з атомної енергетики відзначають [2], у зв'язку з тим що, з одного боку, значна частина устаткування діючих АЕС вичерпала свій ресурс, а, з іншого – обґрунтування ресурсоздатності здійснювалось більше ніж сорок років тому за технологіями того часу, на сьогодні необхідно переосмислити ці питання з урахуванням досвіду експлуатації і нових наукових досягнень.

У Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України в рамках виконання проекту цільової програми НАН України "Ресурс" при підтримці ВП "Рівненська АЕС" створено й успішно експериментально апробовано на трубопроводах живильної води Рівненської АЕС портативний ультразвуковий (УЗ) комп'ютерний томограф (КТ) UST-05M (рис. 1), який функціонує на основі реєстрації шумоподібного зворотно розсіяного структурою металу УЗ сигналу (структурного шуму). Томограф дозволяє експериментально отримувати томографічні зображення просторового розподілу (ПР) в об'ємі виробу розсіювальної здатності структури металу при односторонньому доступі ззовні в процесі експлуатації. Оцінка невпорядкованості реконструйованих томографічних зображень використовується для інформаційної оцінки ПР ступеня деградації металу у вибраних перерізах об'єкта контролю або, наприклад, по товщині трубопроводу [3].

© В. В. КОШОВИЙ, І. М. РОМАНИШИН, Р. І. РОМАНИШИН, О. М. МОКРИЙ, Р. В. ШАРАМАГА, А. В. КИРИЄНКО, П. М. СЕМАК, 2013

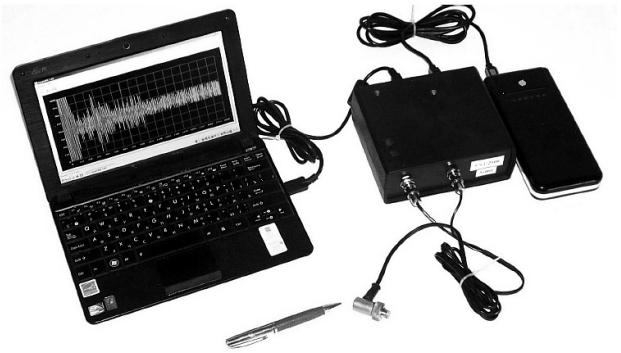

Рис. 1. Ультразвуковий комп'ютерний томограф UST-05M.

Кібернетичний підхід до оцінки ступеня деградації металу в об'ємі об'єктів контролю. Відомо, що деградація матеріалу супроводжується накопиченням розсіяних мікропошкоджень, що призводить до зміни властивостей матеріалу, зародження макротріщин і остаточного руйнування. Фахівці стверджують, що деградація матеріалу зумовлює збільшення невпорядкованості в ПР фізико-механічних і в першу чергу структурних характеристик матеріалу. Це проявляється у збільшенні статистичного розкиду, наприклад, твердості [4].

Оцінка ступеня деградації матеріалу запропонованим способом [5] базується на тому факті, що деградація призводить до структурних змін, які будуть проявлятися в зворотно розсіяному ультразвуковому сигналі. На основі зворотно розсіяного сигналу будується томографічне зображення ПР розсіювальної здатності в об'ємі матеріалу. Для оцінки ступеня деградації в об'ємі матеріалу використовується міра невпорядкованості томографічного зображення ПР розсіювальної здатності матеріалу у вигляді відношення сигнал/шум, яке розраховується для певного набору "точок зображення" в залежності від умов експлуатації об'єкта, апріорної інформації і методики діагностування.

Ультразвукова томографічна технологія експериментальної оцінки ступеня деградації металу в об'ємі товстостінних об'єктів контролю (опишемо на прикладі товстостінного трубопроводу) заключається в наступному:

сканування зовнішньої поверхні об'єкта контролю суміщеним або роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем із багаторазовою реєстрацією зворотно розсіяного структурою металу сигналу (рис. 2);

томографічна реконструкція ПР розсіювальної здатності металу в області контролю;

оцінка ступеня деградації металу в області контролю (наприклад, по товщині трубопроводу) на основі обчислення відношення сигнал/шум (*SNR*) за томографічними зображеннями розсіювальної здатності:

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum\limits_i \sum\limits_j a_{ij}^2}{\sum\limits_i \sum\limits_j (a_{ij} - \bar{a})^2}, \qquad (1)$$

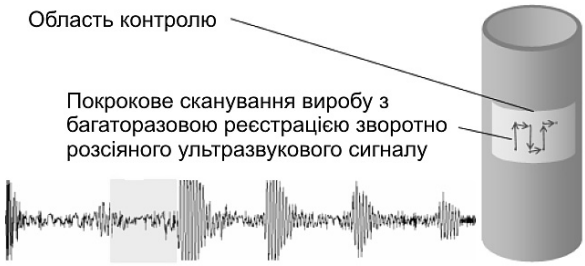

Рис. 2. Схема сканування і приклад зворотно розсіяного сигналу.

де a_{ij} $(i=1, 2, ..., N;\ j=1, 2, ..., M)$ – елементи зображень, за якими проводиться підсумовування; $\bar{a}$ – середнє значення, $\bar{a}=\dfrac{1}{MN}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}a_{ij}$.

Відмітимо, що з ростом деградації *SNR* зменшується.

На рис. 3 приведено томографічні зображення розсіювальної здатності в окремих осьових перерізах по товщині трубопроводу та співвідношення сигнал/шум, обчислені вздовж ліній, рівновіддалених від осі циліндра на різних глибинах, для трубопроводу живильної води зі зварним з'єднанням із напрацюванням 25 тис. год та без напрацювання.

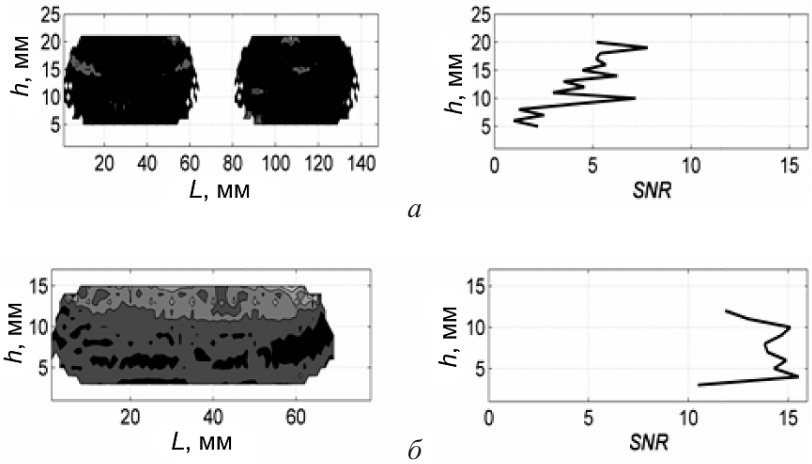

Рис. 3. Томографічні осьові перерізи і розподіл *SNR* по товщині стінки трубопроводу зі зварним з'єднанням із напрацюванням 25 тис. год (*а*) та без напрацювання (*б*).

Як показали експерименти, для трубопроводу з напрацюванням 25 тис. год *SNR* знаходиться в межах 2...6 (великий "шум") і змінюється з товщиною його стінки, що може свідчити про нерівномірність деградаційних процесів по товщині. Для трубопроводу без напрацювання *SNR* лежить у межах 12...16 (малий "шум") і значно менше змінюється по товщині.

Розвиток технологій оцінки параметрів стану металу в об'ємі виробу. Як відомо, ступінь деградації оцінюють на основі безпосереднього вимірювання твердості, границь пластичності, міцності, опору крихкому руйнуванню тощо.

Запропоновано наступну методику переходу від експериментальних акустичних вимірювань до визначення деградаційних параметрів неруйнівним методом: вимірювання амплітуди зворотно розсіяного сигналу – томографічна реконструкція ПР розсіювальної здатності – розрахунок ПР коефіцієнта розсіювання на основі ПР розсіювальної здатності – розрахунок ПР параметрів стану матеріалу на основі ПР коефіцієнта розсіювання та теоретичного або емпіричного співвідношення між коефіцієнтом розсіювання і відповідним параметром стану матеріалу.

Отримано співвідношення між ПР розсіювальної здатності $u(x, y, z)$, що будується на основі томографічних співвідношень за сферичними проекціями, виходячи з експериментально зареєстрованого зворотно розсіяного сигналу та ПР коефіцієнта розсіювання $\delta_s(x, y, z)$:

$$\delta_s(x, y, z) = \frac{1}{2r} \ln \frac{2U(x, y)H(x, y)\delta(x, y)}{u(x, y, z)(1 - e^{-2\delta(x, y)H(x, y)})} - \delta(x, y), \qquad (2)$$

де $U(x, y)$, $H(x, y)$, $\delta(x, y)$ – С-скани розсіювальної здатності, товщини та загасання відповідно.

Відомо, що границі текучості і міцності та твердість суттєво залежать від розміру зерна кристала. Просторовий розподіл розміру зерна є найбільш використовуваним для оцінки ступеня деградації.

Запропоновано **метод експериментальної реконструкції просторового розподілу розміру зерна** на основі:

сканування області контролю зовнішньої поверхні об'єкта з багаторазовою реєстрацією (у кожній точці) і статистичною обробкою розширеної часової реалізації А-скану з багаторазовими відбитими донними сигналами і на базі цього:

побудови С-скану товщини (рельєфу відбиваючої поверхні) $H(x, y)$;

побудови С-скану просторового розподілу коефіцієнта загасання $\delta(x, y)$;

побудови С-скану просторового розподілу коефіцієнта загасання $U(x, y)$;

томографічної реконструкції просторового розподілу розсіювальної здатності металу $u(x, y, z)$;

розрахунку просторового розподілу коефіцієнта розсіювання $\delta_s(x, y, z)$ за експериментально отриманим просторовим розподілом розсіювальної здатності $u(x, y, z)$ на основі співвідношення (2);

розрахунку просторового розподілу розміру зерна за експериментально отриманим просторовим розподілом коефіцієнта розсіювання $\delta_s(x, y, z)$ та за співвідношенням між коефіцієнтом розсіювання і розміром зерна. У випадку, коли таким співвідношенням є теоретичне релеєвське наближення коефіцієнта розсіювання, маємо безеталонний метод визначення просторового розподілу розміру зерна. Коли релеєвське наближення використовувати некоректно (довжина хвилі сумірна або менша за розмір зерна), потрібно брати емпіричне співвідношення між коефіцієнтом розсіювання і розміром зерна, яке має бути попередньо отримане на еталонних зразках.

Просторовий розподіл границь текучості і міцності та твердість визначаються на основі ПР розміру зерна та емпіричних або теоретичних залежностей між розміром зерна і відповідним параметром стану металу.

Отримання емпіричних залежностей між інформативними параметрами ультразвукового сигналу і параметрами стану матеріалу базується на експериментальних дослідженнях акустико-механічних залежностей.

Можливості застосування УЗ технологій на основі реєстрації зворотно розсіяного УЗ сигналу і режим роботи ПК залежать від рівня розсіяного сигналу.

У випадку, коли рівень розсіяного сигналу незначний і спостерігаються багаторазово відбиті донні сигнали, оцінка стану металу і виробу в цілому проводяться за допомогою традиційних підходів.

У програмному комплексі реалізовано ряд процедур обробки зареєстрованих реалізацій зворотно розсіяного сигналу з багаторазово відбитими донними імпульсами. У результаті цього розроблений томограф може реалізувати режими інших приладів неруйнівного контролю.

1. Діагностика товстолистового зразка починається з визначення швидкості поширення УЗ поздовжньої хвилі в еталонному зразку з того ж матеріалу. Для цього штангенциркулем вимірюється товщина зразка і на основі багаторазово відбитого сигналу обчислюється швидкість поширення УЗ хвилі.

2. Визначення товщини товстостінного об’єкта контролю проводиться за наявності відбитого донного імпульсу на основі тривалості між імпульсом, відбитим від границі призма п’єзоперетворювача–метал, та першим донним відбитим імпульсом. Використання імпульсу від границі призма–метал спрощує процедуру, оскільки його положення відоме. Визначення товщини відбувається в два етапи. На першому проводиться визначення тривалості пороговим методом на основі демодульованого сигналу, на другому – кореляційним методом на основі зворотно розсіяного сигналу. У випадку кількох відбитих донних імпульсів проводиться уточнення товщини. У залежності від товщини проведено моделювання визначення її точності. Ці результати дозволяють оцінити граничні можливості розроблених технологій.

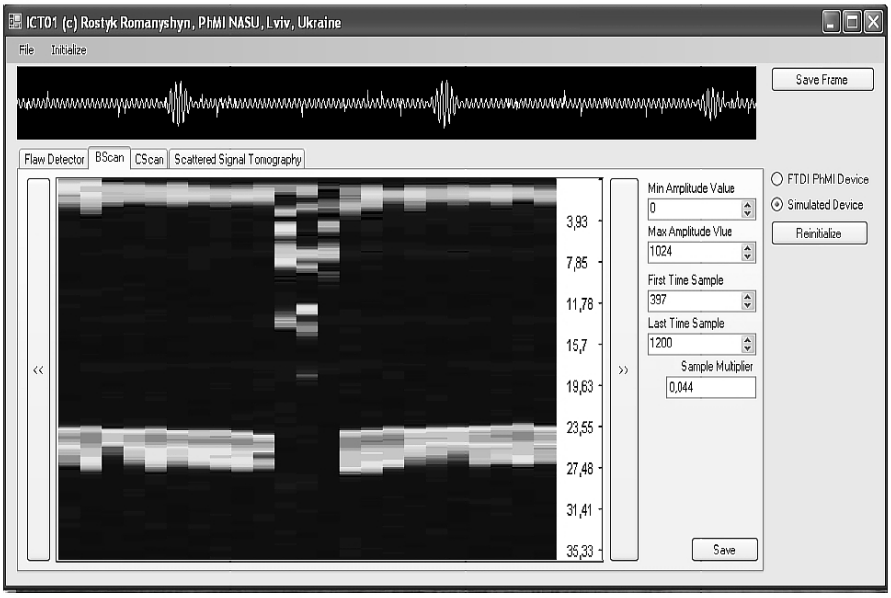

Рис. 4. Вікно програмного забезпечення УЗ КТ UST-05M в режимі візуалізації В-скану.

3. Визначення поглинання проводиться за наявності кількох багаторазово відбитих сигналів. Традиційно коефіцієнт поглинання визначається з 10%-ною похибкою. Для уточнення проводиться багаторазове визначення коефіцієнта поглинання.

4. Зареєстровані А-скани в процесі сканування візуалізуються у вигляді В-скану (рис. 4). Це дозволяє розширити можливості аналізу ультразвукового зондування.

5. Визначені параметри (товщина, коефіцієнт поглинання) при скануванні поля контролю візуалізуються у вигляді С-сканів. На основі такого представлення можна відображати рельєф дна (важлива задача при діагностиці згинів товстостінних трубопроводів), "малювати" карти прилягання бандажів тощо.

Результати діагностики заносяться в базу даних.

Програмний пакет є зручним для користувача та легко доповнюється розробником новими об'єктами.

Р е з ю м е

Разработаны технологии ультразвуковой компьютерной томографии для оценки параметров состояния металла толстостенных трубопроводов АЭС. Разработанные технологии реализованы в ультразвуковом томографе на рассеянном сигнале. Они базируются на сканировании внешней поверхности трубопровода прямым пьезопреобразователем, регистрации обратно рассеянного сигнала, томографической реконструкции рассеивающей способности металла, оценке степени деградации в объеме металла на основе томографических изображений.

1. *Lee J.-R.*, *Jeong H.*, *Chia C. C.*, *et al*. Application of ultrasonic wave propagation imaging method to automatic damage visualization of nuclear power plant pipeline // Nucl. Eng. Design. – 2010. – **240**. – P. 3513 – 3520.
2. *Гетман А. Ф*. Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 427 с.
3. *Кошовий В. В.*, *Романишин І. М.*, *Романишин Р. І. та ін.* Оцінювання ступеня експлуатаційної деградації металу товстостінних трубопроводів АЕС засобами ультразвукової томограії // Цільова комплексна програма НАН України "Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин". – Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2009. – С. 278 – 284.
4. *Лебедев А. А*. Новые характеристики деградации материала на стадии развития рассеянных повреждений // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – № 4. – С. 35 – 44.
5. *Пат. України № 44165*. Спосіб оцінки деградації матеріалу на основі томографічних зображень / В. В. Кошовий, І. М. Романишин, Р. І. Романишин, М. А. Шама, Р. В. Шарамага. – Чинний з 25.09.2009.

Поступила 03. 10. 2012