

© 2009 В. В. Кошовий^а, І. М. Романишин^а, Р. І. Романишин^а,
М. А. Шама^б, Р. В. Шараміга^а

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

^б Рівненська АЕС, Кузнецовськ, Україна

ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ МЕТАЛУ НА ОСНОВІ ЗОБРАЖЕНЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОМОГРАФІЇ

Викладено новий неруйнівний (ультразвуковий) метод експериментальної оцінки ступеня експлуатаційної деградації металу в об'ємі товстостінних циліндричних об'єктів (трубопроводи) атомних електростанцій на базі томографічних зображень, відновлених з допомогою реєстрації ультразвукових сигналів, розсіяних мікроструктурою металу.

Ключові слова: деградація металу, ультразвукова томографія, розсіяний сигнал.

Актуальною задачею матеріалознавства є оцінка експлуатаційної деградації матеріалу неруйнівними методами. Зародження і накопичення розсіяних пошкоджень в конструкційних матеріалах відбувається з самого початку їх експлуатації і приводить до змін властивостей матеріалу, зародження макротріщин і остаточного руйнування. Для дослідження та оцінки пошкоджуваності використовують феноменологічні підходи: прямі і непрямі методи [1]. До прямих методів відносять фрактографію. Серед непрямих методів – вимірювання «дефекту» (відносного відхилення від еталонного значення) різних фізико-механічних характеристик (густини, модуля пружності, мікротвердості), електричного опору.

Один з підходів до оцінки пошкоджуваності (деградації) конструкційних матеріалів базується на багатократному вимірюванні твердості (або інших фізико-механічних характеристик матеріалу) та обчисленні статистичних характеристик вимірюваних величин, наприклад, параметрів розсіювання твердості [2]. Фізичним обґрунтуванням цього підходу є те, що ступінь розсіювання фізико-механічних характеристик (в тому числі твердості) залежить від їх структурного стану, який змінюється в процесі деградації матеріалу.

Однак при такому підході неможливо отримати оцінку деградації матеріалу в об'ємі виробу, наприклад, по товщині товстостінного виробу. Хоча відомо, що в процесі експлуатації товстостінних трубопроводів внутрішня частина деградує більше, і ступінь деградації матеріалу від внутрішньої поверхні товстостінного трубопроводу до зовнішньої поверхні зменшується.

Пропонований підхід позбавлений цього обмеження і базується на припущенні, що деградація матеріалу є просторово-часовим процесом і супроводжується локалізованим посиленням структурної неоднорідності в об'ємі матеріалу на всіх масштабних рівнях, що приводить до зародження та розвитку дефектів. Одним з найчутливіших параметрів до структурних характеристик матеріалу є розсіяний ультразвуковий сигнал. Метод

ультразвукової томографії на основі реєстрації розсіяного структурою матеріалу ультразвукового сигналу є одним з найбільш інформативних та завадостійких для експериментальної оцінки структурних неоднорідностей в об'ємі матеріалу на мезорівні (~ 1 мм для сталей) в переддефектному стані.

Методика оцінки експлуатаційної деградації на основі томографічних зображень товстостінних циліндричних об'єктів зводиться до:

– ультразвукового сканування виробу із зовнішньої поверхні з реєстрацією розсіяного структурою матеріалу ультразвукового сигналу у вигляді А-сканів;

– обробки зареєстрованих А-сканів з виділенням інформативної частини, з врахуванням «мертвої зони», обумовленої зондуєчим сигналом, загасання, форми сигналу, промислових завод та формування сферичних проекцій;

– побудови С-скану - інтегрального (усередненого по товщині) зображення коефіцієнту розсіювання металу у вигляді панорамного зображення циліндричної поверхні сканування, яке є пошуковим для встановлення аномальних областей;

– побудови томографічних зображень розсіюючої здатності металу по товщині вздовж циліндричного виробу;

– знаходження відношення сигнал/шум для томографічних зображень або вздовж ліній томографічних зображень (в залежності від фізичних умов експлуатації трубопроводу та відповідної методики контролю), яке є кількісною експериментальною оцінкою експлуатаційної деградації металу в об'ємі товстостінного циліндричного виробу.

Збір даних здійснюється шляхом сканування прямим суміщеним ультразвуковим перетворювачем по зовнішній поверхні циліндричного виробу з кроком Δs (рис. 1,а) і реєстрація зворотно розсіяного структурою матеріалу ультразвукового сигналу у вигляді А-скану (рис. 1,б) в полі контролю $n \times m$ точок.

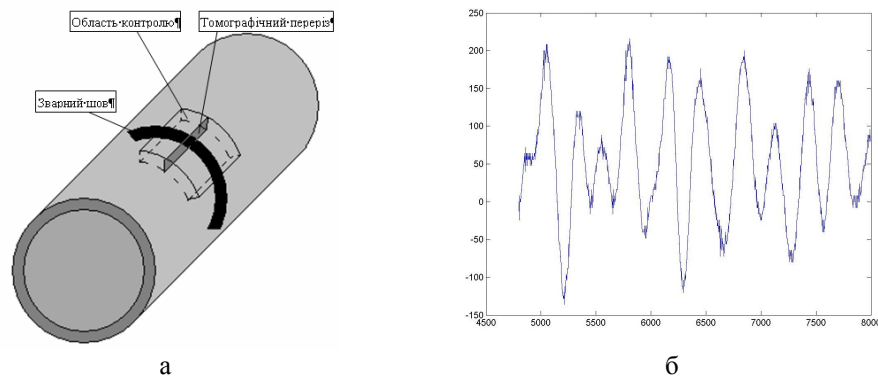


Рис. 1. Геометрія збору даних (а) і приклад зареєстрованого А-скану (б).

При поширенні ультразвукового сигналу в неоднорідному матеріалі відбувається модуляція параметрів зондуєчого сигналу структурою матеріалу. Характерні розміри розсіюючої неоднорідності, яку можна виділити на основі реєстрації розсіяного назад сигналу, визначаються

довжиною зондуєної хвилі. Так для сталей ($c \sim 5 \times 10^3$ м/с) при частоті зондуєного сигналу 5 МГц $\lambda \sim 1,2$ мм.

Кожному значенню часової реалізації А-скану (рис. 1,б) відповідає область розсіювання – сфера з центром в точці вводу-прийому і радіусом $r = t / 2c$, який визначається часом поширення сигналу.

Інтегральна оцінка розсіяної складової проводиться шляхом побудови С-скану у вигляді панорамного зображення циліндричної поверхні сканування, кожна точка якого відповідає точці сканування і отримується шляхом усереднення модулів (квадратів) відліків зареєстрованого зворотно розсіяного сигналу у вигляді А-скану по всій реалізації

$$S(i, j) = \sum_{k=1}^N \frac{s_k^2}{N}, \quad (1)$$

де s_k ($k = 1, \dots, N$) – відліки, N – кількість відліків А-скану.

Одним з ефективних методів томографічного відтворення, стійких до похибок вимірювання і повноти збору, є метод сумарного зображення. Для побудови сумарного зображення застосовується безсітковий підхід [3], який зводиться до оберненого проектування по всіх вимірних проекціях, формування файлу даних з результатами оберненого проектування та побудови зображення шляхом усереднення результатів оберненого проектування за допомогою вибраного шаблону.

На рис. 2,а приведено панорамне зображення С-скану, що відповідає полю контролю 11×25 точок, кожна точка якого отримана шляхом усереднення квадратів відліків зареєстрованого А-скану по всій реалізації.

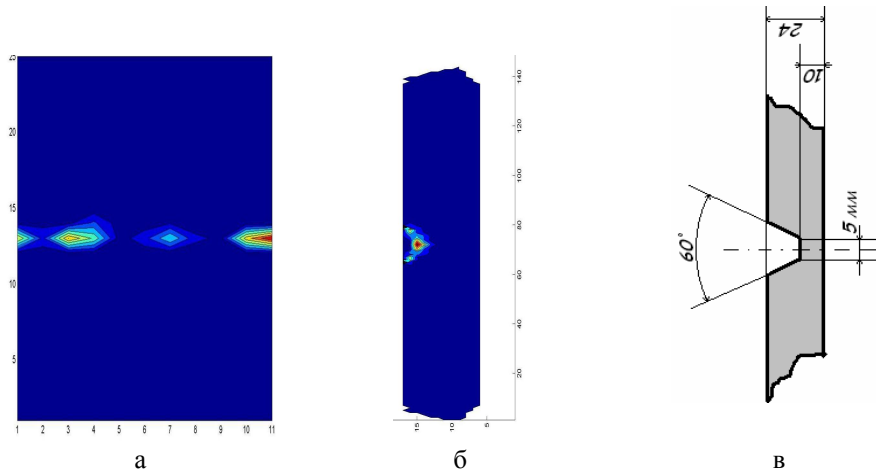


Рис. 2. С-скан (а), томографічний переріз (б) та ескіз зварного шва (в).

С-скан є пошуковим зображенням, на основі якого можна визначати аномальні області, які надалі необхідно досліджувати по глибині методами 3D-томографії.

Як видно з С-скану, в області зварного шва розсіююча здатність мікроструктури металу відрізняється від розсіюючої здатності основного металу.

На основі зареєстрованих зворотно розсіяних сигналів у вигляді А-сканів будувалось 3D-сумарне зображення розсіюючої здатності металу в об'ємі виробу за безсітковим підходом.

На рис. 2,б приведено томографічний переріз по товщині, який відповідає на С-скані третій лінійці по вертикалі. Як бачимо, експериментальні результати томографічного відновлення розсіюючої здатності по товщині (рис. 2,б) добре узгоджуються з розмірами зварного з'єднання (рис. 2,с).

Для кількісної характеристики нерівномірності розподілу розсіюючої складової запропоновано використати параметр, аналогічний співвідношенню сигнал/шум, який використовують при порівнянні зображення з еталоном:

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum_i \sum_j a_{ij}^2}{\sum_i \sum_j (a_{ij} - \bar{a})^2}, \quad (2)$$

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

Для однорідного зображення $a_{ij} = \bar{a}$ ($i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M$) (при відсутності неоднорідностей) $SNR \rightarrow \infty$.

Як позитивну особливість, слід відмітити, що дане співвідношення практично не залежить від величин a_{ij} , а тільки від нерівномірності їх розподілу.

Відмітимо, що наведене співвідношення можна обчислювати по довільній кривій чи поверхні в об'ємі виробу.

Оцінка деградації матеріалу на основі панорамного зображення С-скану.

Методика оцінки експлуатаційної деградації на основі панорамного зображення С-скану дозволяє отримати оцінку деградації окремих перерізів трубопроводу вздовж його осі.

Нижче приведені результати експериментальної апробації методики оцінювання ступеня деградації окремих січень вздовж осі трубопроводу для двох об'єктів: трубопроводу живильної води другого контуру одного із блоків Рівненській АЕС (в промислових умовах), який має напрацювання ~ 250000 годин та трубопроводу, наданого Рівненською АЕС, метал якого не має напрацювання.

Область контролю трубопроводу з напрацюванням включала зварний шов з валиком підсилення. Проводилось сканування поверхні зразка (16×24) прямим ультразвуковим перетворювачем (5 МГц) з кроком 5 мм і реєстрація розсіяного сигналу з частотою дискретизації 25 МГц. Область контролю, що включала валик підсилення, не сканувалась.

На рис.3 приведено типовий приклад панорамного зображення С-скану, що відповідає області сканування (16×24) зовнішньої поверхні циліндричного виробу, експериментально отримані томографічні зображення розсіюючої здатності ультразвуку матеріалом в окремих перерізах по товщині виробу вздовж циліндра з різним ступенем деградації та обчислений параметр *SNR* для цих перерізів.

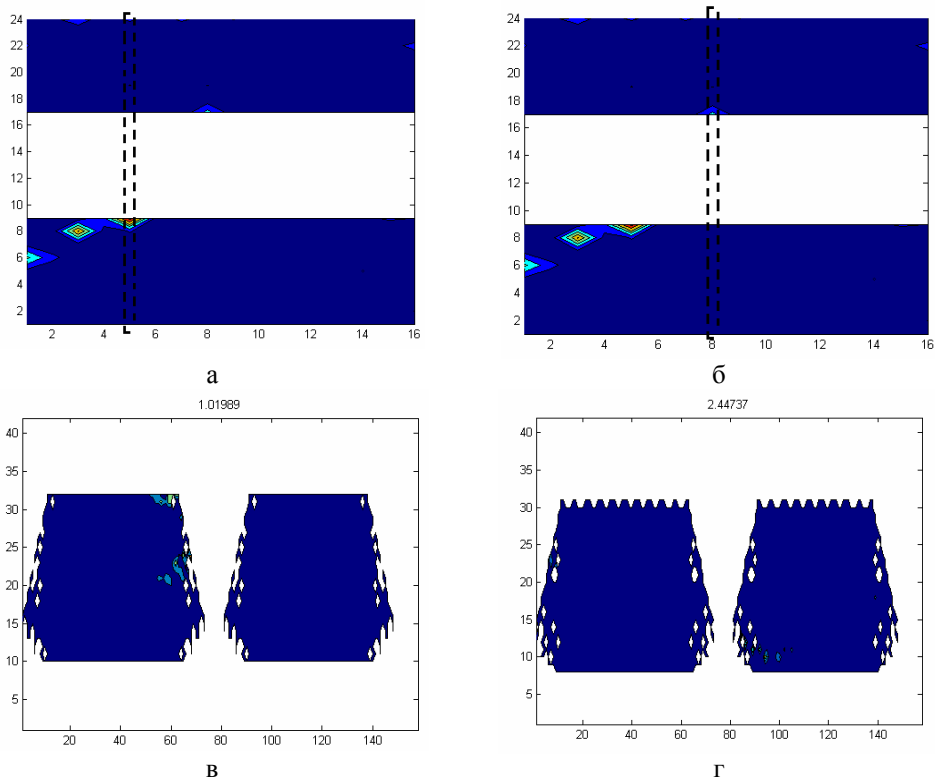


Рис. 3. С-скан (а, б), томографічні зображення окремих січень (в, г) та *SNR*.

Як показали експериментальні дослідження, для трубопроводу з напрацюванням ~250000 годин параметр *SNR* для томографічних зображень перерізів розсіюючої здатності ультразвуку матеріалом з різним ступенем деградації знаходиться в межах 1÷2,5, а для трубопроводу без напрацювання параметр *SNR* для томографічних зображень перерізів коефіцієнта розсіювання ультразвуку матеріалом знаходиться в межах 3÷4,5.

Оцінювання ступеня деградації матеріалу по товщині тіла трубопроводу проводилося на основі обчислення параметра (2) за відновленими томографічними зображеннями розсіюючої здатності ультразвуку структурою металу в окремих перерізах, розташованих вздовж трубопроводу по лініях, рівновіддалених від його осі. Така методика усуває методичну похибку, властиву методу ультразвукової комп'ютерної томографії на розсіяному сигналі і зв'язану із загасанням сигналу. Очевидно, що для однорідного розподілу (при відсутності «шуму») значення параметра

SNR буде великим. Із збільшенням деградації (зростанням «шуму») відношення сигнал/шум буде зменшуватися. Отже, менш деградовані ділянки будуть характеризуватися більшими значеннями параметра SNR . Деградація металу трубопроводу по товщині (від внутрішньої до зовнішньої поверхні) буде зменшуватися і буде супроводжуватися збільшенням значення критерію SNR . Для трубопроводу без напрацювання (без деградації) така тенденція не матиме місця, а відношення сигнал/шум буде вищим, ніж для трубопроводів з напрацюванням.

На рис. 4 наведені приклади отриманих експериментально томографічного і панорамних виду С-скан зображень просторового розсіюючої здатності ультразвуку мікроструктурою металу та розподіли параметра SNR вздовж товщини тіла трубопроводу.

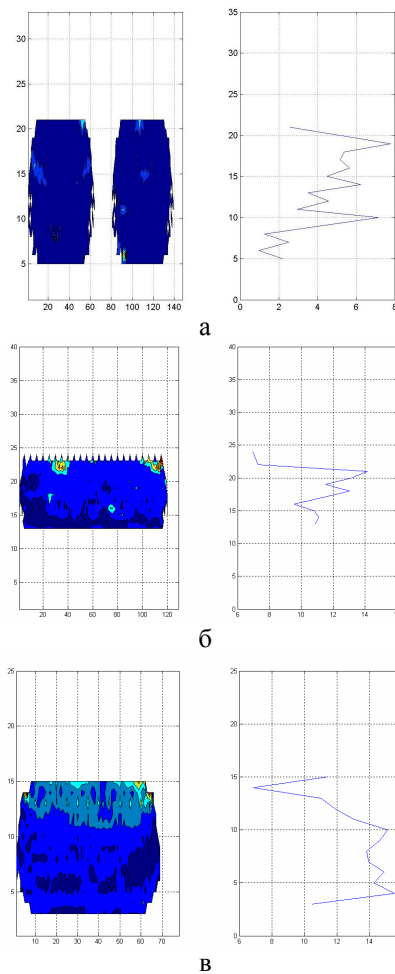


Рис. 4. Томографічні зображення (а) просторового розподілу розсіяної складової ультразвукового сигналу та графіки розподілів по товщині величини параметра SNR в перерізах трубопроводу живильної води з валиком підсилення з терміном напрацювання $T_n \cong 250$ тис. год. (а), трубопроводу ТЕС з невідомим терміном напрацювання (б) і трубопроводу живильної води без напрацювання (в).

Зміна параметра SNR по товщині у перерізі трубопроводу живильної води з валиком підсилення з напрацюванням ~ 250 тис. год. (рис. 4,а) свідчить про вищу “зашумленість” зображення нижніх шарів тіла трубопроводу, що обумовлено вищим ступенем деградації металу в цих шарах.

Аналогічні експерименти проводилися також на сегменті трубопроводу ТЕС, метал якого мав невідомий термін напрацювання, та на сегменті трубопроводу живильної води на Рівненській АЕС, метал якого ще не мав напрацювання. При цьому у першому випадку сканування здійснювалося прямим УЗ перетворювачем на частоті 5 МГц з кроком 5 мм, а реєстрація розсіяного мікроструктурою металу УЗ сигналу з частотою дискретизації 25 МГц у полі контролю 21×21 точок. У другому випадку збір даних проводився шляхом сканування прямим УЗ перетворювачем з кроком 5 мм, а реєстрація розсіяного УЗ сигналу частотою 5 МГц з частотою дискретизації 250 МГц у полі контролю 11×10 точок.

Як видно з результатів експериментів, зміна величини параметра SNR вздовж товщини стінки трубопроводу з нульовим напрацюванням не має явно виражених тенденцій до пониження або підвищення з глибиною, відсутня також тенденція збільшення параметра SNR від внутрішньої поверхні до зовнішньої, яка характерна для об'єктів з напрацюванням, що свідчить про більш-менш рівномірний ПР розсіюючої здатності мікроструктури металу в об'ємі тіла трубопроводу, оскільки його метал ще не має експлуатаційного напрацювання і деградаційні процеси ще не проявилися.

Експериментальні дослідження показали, що для металу трубопроводу з напрацюванням ~ 250 тис. год. величина параметра $SNR \cong (2 \div 4)$ і зростає від внутрішньої до зовнішньої поверхні трубопроводу, що відображає зменшення ступеня деградації металу. Для металу трубопроводу без напрацювання значення параметра $SNR \cong (12 \div 16)$ і не спостерігається його зміни вздовж товщини тіла трубопроводу.

Отримані результати дозволили запропонувати нову методику неруйнівного оцінювання терміну напрацювання металу трубопроводу на основі експериментального визначення величини параметра SNR .

Запропонована неруйнівна методика експериментального оцінювання об'ємного розподілу ступеня експлуатаційної деградації металу в товстостінних трубопроводах є простою для прикладної реалізації, практично не вимагає додаткового обладнання та особливої підготовки об'єкту контролю.

Summary

The paper represents new nondestructive (ultrasound) method of the experimental estimation of a operating degradation degree spatial distribution in the metalick thick-walled cylinder objects (pipelines) of nuclear power plants on the basis of tomographic images reconstructed by the instrumentality of ultrasound signals scattered by a microstructure of the metal registration.

Keywords: degradation of the metal, ultrasonic tomography, scattered signal.

Резюме

Изложен новый неразрушающий (ультразвуковой) метод экспериментальной оценки степени эксплуатационной деградации металла в объеме толстостенных цилиндрических объектов (трубопроводы) атомных электростанций на базе томографических изображений, восстановленных при помощи регистрации ультразвуковых сигналов, рассеянных микроструктурой металла.

Ключевые слова: деградация металла, ультразвуковая томография, рассеянный сигнал.

1. *Бобырь Н. И., Бабенко А. Е., Халимон А. П.* Континуальная механика поврежденности и ее использование в задачах сложного малоциклового нагружения // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – № 4. – С. 25 – 34.
2. *Лебедев А. А.* Новые характеристики деградации материала на стадии развития рассеянных повреждений // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – № 4. – С. 35 – 44.
3. *Романишин Р. И.* Бессеточный подход к томографическому восстановлению неоднородностей в объектах с криволинейными границами / Материалы 14 Международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики. – Ялта, 10-20 октября 2006 г. – С. 69 – 71.

Поступила 22.05.2009