

УДК 621.129.32

РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ТОМОГРАФІЇ ДЛЯ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

В. В. КОШОВИЙ, І. М. РОМАНИШИН, О. М. МОКРИЙ, Р. І. РОМАНИШИН

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

Подано досягнення ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України в розвитку методів і засобів ультразвукової комп'ютерної томографії конструкційних матеріалів впродовж останнього десятиліття. Наведено результати досліджень товстостішових виробів зі зварними з'єднаннями за допомогою трансмісійного ультразвукового комп'ютерного томографа. Описано технології оцінювання просторового розподілу розсіювальної здатності металу в товстостінних трубопроводах за допомогою ультразвукового комп'ютерного томографа на основі реєстрації розсіяного ультразвукового сигналу, які мають перспективу впровадження на об'єктах АЕС. Наведено результати експериментальної апробації технологій пасивної ультразвукової комп'ютерної томографії.

Ключові слова: *ультразвукова томографія, розсіяний ультразвуковий сигнал.*

З середини 80-х років ХХ століття у Фізико-механічному інституті НАН України розвивають нові методи та інформаційні технології ультразвукової комп'ютерної томографії для матеріалознавчих досліджень і оцінювання стану конструкційних матеріалів у товстостішових об'єктах контролю. Створено низку експериментальних зразків ультразвукових комп'ютерних томографів для лабораторного і промислового застосування. Алгоритмічно-програмне забезпечення цих томографів дає змогу реконструювати просторовий розподіл акустичних характеристик матеріалу за різних схем зондування і реєстрації різних типів ультразвукових (УЗ) сигналів, що формуються під час поширення зондувальних УЗ хвиль у матеріалі та в результаті їх взаємодії з дефектами і мікроструктурою середовища, а саме: луносигнали від дефектів, трансмісійні, розсіяні мікроструктурою матеріалу, акустико-емісійні. Враховуючи кількісний зв'язок між параметрами зондувального УЗ сигналу (відновлювальними акустичними характеристиками) та механічного стану матеріалу, можна визначити просторовий розподіл параметрів механічного стану матеріалу та виявити місця можливого зародження дефектів.

Неруйнівна діагностика зварних з'єднань засобами ультразвукової трансмісійної комп'ютерної томографії. Об'ємна однорідність фізико-механічних характеристик металу в зоні термічного впливу в значній мірі визначає якість технологічного зварювання і міцнісні характеристики зварного з'єднання. Один із сучасних підходів, який потенційно дає змогу ефективно розв'язати задачу оцінювання об'ємної однорідності механічних властивостей металу, ґрунтується на принципах ультразвукової комп'ютерної томографії.

Для контролю товстостішових виробів зі зварним з'єднанням на основі дзеркально-тіньової схеми (рис. 1) перспективним з точки зору інформативності і практичної реалізації є метод томографічної 3D-реконструкції під час одноразового збору даних (в конусі) за одностороннього доступу до поверхні виробу.

Результати експериментальних досліджень, отримані з використанням розроблених технічних засобів [1], ілюструють можливості томографічних підходів

для оцінювання симетричності просторового розподілу властивостей матеріалу відносно зварного з'єднання та рівномірності вздовж нього (рис. 2).

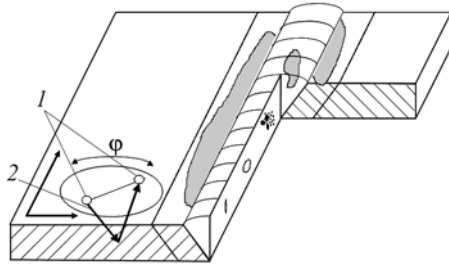


Рис. 1. Дзеркально-тіньова схема збору даних під час ультразвукового зондування об'єму товстості листового виробу зі зварним з'єднанням шляхом сканування поверхні випромінювальною/приймальною парою ультразвукових давачів уздовж координат x, y та кута φ : 1 – давачі; 2 – променева проекція.

Fig. 1. The mirror-shadow scheme of data gathering under ultrasonic sounding of a sheet product with a welded joint by scanning the product surface with a pair of generating/receiving ultrasonic transducers along coordinates x, y and angle φ : 1 – transducers; 2 – ray projection.

Наведено (рис. 2) томографічні зображення просторового розподілу повільності у зразку зі зварним з'єднанням.

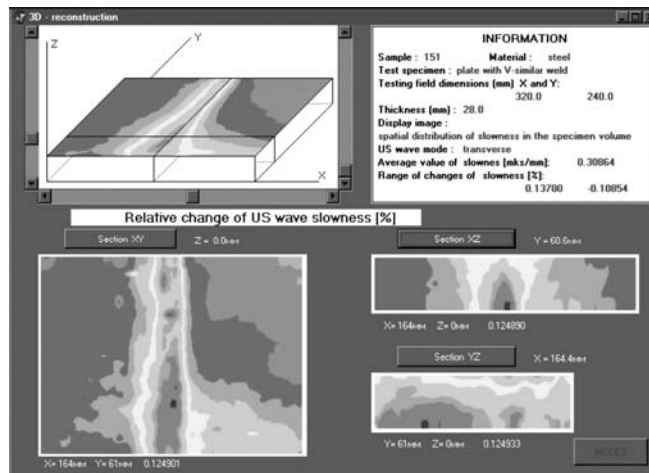


Рис. 2. Результати томографічної реконструкції повільності поперечної УЗ хвилі у зразку зі зварним з'єднанням.

Fig. 2. Results of tomographic reconstruction of slowness of the transverse ultrasonic wave in the specimen with a welded joint.

Як показали експерименти, технологія ультразвукової томографії дає змогу не лише проводити якісну оцінку об'ємної однорідності вибраної акустичної (або механічної) характеристики матеріалу, але і оцінити кількісно відносні (по відношенню до середнього значення в об'ємі поля контролю) зміни цієї характеристики.

На основі математичних виразів для променевої проекції, операторів оберненого проектування та сумарного зображення отримано співвідношення між побудованим сумарним зображенням та шуканим розподілом у вигляді згортки, яке в частотній області має вигляд [1]

$$\hat{b}(u, v, w) = \hat{g}(u, v, w) \begin{cases} \frac{2\pi}{\sqrt{u^2 + v^2 - w^2 \operatorname{tg} \gamma_0}}, & |\operatorname{wtg} \gamma_0| < \sqrt{u^2 + v^2}, \\ 0, & |\operatorname{wtg} \gamma_0| > \sqrt{u^2 + v^2}, \end{cases} \quad (1)$$

де u, v, w – просторові частоти; $\hat{b}(u, v, w)$, $\hat{g}(u, v, w)$ – Фур'є-перетворення сумарного зображення і шуканого розподілу; $\gamma_0 = \pi/2 - \theta_{\max}$, θ_{\max} – ракурс озвучення.

Як видно з цього співвідношення, сумарне зображення, відновлене на основі проєкційних даних, зібраних у листовому виробі на основі одноракурсної дзеркально-тіньової схеми (див. рис. 1), не містить інформацію про просторові частоти відновлюваної функції $g(x, y, z)$, які знаходяться в конусі, обмеженому кутом γ_0 (рис. 3a). Без цієї інформації не можна відновити функцію $g(x, y, z)$ без спотворень.

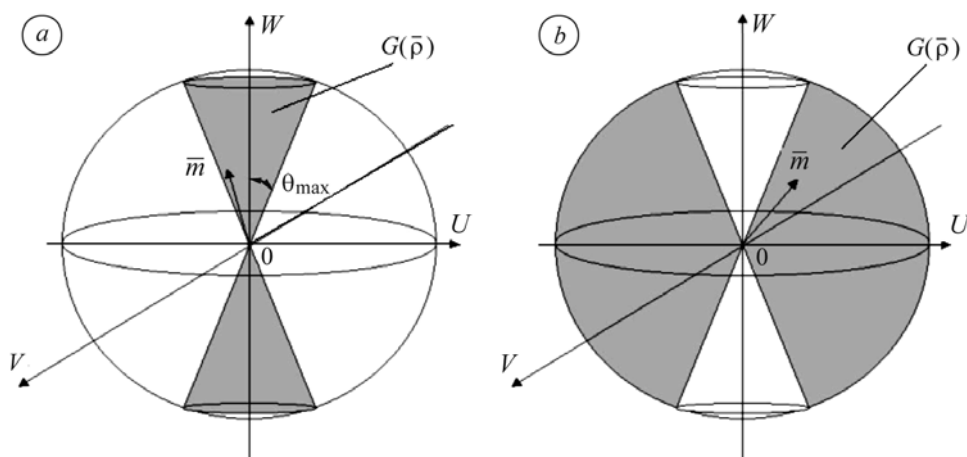


Рис. 3. Інформаційні обмеження під час застосування одноракурсної дзеркально-тіньової схеми збору даних у томографічному експерименті з використанням листового виробу.

Fig. 3. Information restrictions in application of the one-angular sounding mirror-shadow scheme of data gathering in the tomographic experiment with the use of a sheet product.

Звідси робимо важливий висновок про те, що якість томографічного відновлення просторового розподілу властивостей матеріалу вздовж товщини (координати z) листового виробу (тобто наявність у відновленому зображенні високих просторових частот w) залежить від просторово-частотного розподілу (частот u, v) неоднорідностей матеріалу у площині координат x, y . Тобто, що контрастніші зміни властивостей матеріалу в площині листового виробу, то краще (точніше) можна відновити їх просторовий розподіл вздовж товщини виробу. Класичним прикладом таких об'єктів контролю є листові вироби зі зварними з'єднаннями, в яких властивості металу у зоні термічного впливу в площині листа змінюються вздовж координат x, y .

В той же час метод ультразвукового томографічного контролю на основі реєстрації розсіяного сигналу ефективно відновлює просторові зміни властивостей металу вздовж товщини листового виробу (вісь z) і в інформаційному сенсі (рис. 3b) доповнює тіньовий та дзеркально-тіньовий методи контролю, які ефективні під час відновлення неоднорідностей, параметри яких змінюються у площині (x, y) , і підвищує якість реконструкції вздовж товщини листового виробу, що дуже актуально для задач оцінювання ступеня експлуатаційної деградації металу в стінках трубопроводів різного призначення.

Оцінювання розсіювальної здатності в об'ємі матеріалу засобами ультразвукової комп'ютерної томографії на основі реєстрації розсіяного сигналу. Актуальною задачею матеріалознавства є оцінка експлуатаційної деградації матеріалу неруйнівними методами. Зародження та накопичення розсіяних пошкоджень у конструкційних матеріалах відбувається від початку їх експлуатації і призводить до змін властивостей матеріалу, утворення макротріщин і остаточного руйнування. Для дослідження та оцінки пошкодженості використовують феноменологічні підходи: прямі і непрямі методи [2]. До прямих методів відносять фрактографію. Серед непрямих – вимірювання “дефекту” (відносного відхилення

від еталонного значення) різних фізико-механічних характеристик (щільності, модуля пружності, мікротвердості).

Однак за такого підходу неможливо оцінити деградацію матеріалу в об'ємі виробу, наприклад, вздовж товщини товстостінового виробу. Хоча відомо, що під час експлуатації товстостінних трубопроводів внутрішня частина деградує більше, і ступінь деградації матеріалу від внутрішньої поверхні товстостінного трубопроводу до зовнішньої змінюється.

Пропонований підхід [3, 4] позбавлений цього обмеження і базується на припущенні, що деградація матеріалу – просторово-часовий процес, який супроводжується локалізованим посиленням структурної неоднорідності в об'ємі матеріалу на всіх масштабних рівнях, що призводить до зародження і розвитку дефектів [5]. Одним з найчутливіших параметрів до структурних змін матеріалу є розсіяний ультразвуковий сигнал. Метод ультразвукової томографії на основі реєстрації розсіяною структурою матеріалу ультразвукового сигналу один з найінформативніших і завадостійких для експериментальної оцінки структурної неоднорідності в об'ємі матеріалу на мезорівні (~1 mm для сталей) в переддефектному стані.

Цей метод розроблено для циліндричних виробів за одностороннього доступу на основі [6, 7] ультразвукового зондування матеріалу з поверхні виробу прямим суміщеним перетворювачем в полі контролю $n \times m$ точок з реєстрацією зворотно розсіяного структурою матеріалу ультразвукового сигналу у вигляді А-скану; обробки зареєстрованого А-скану і формування сферичних проекцій з врахуванням ефектів взаємодії зондувального поля з матеріалом (зникання сигналу, геометричного розходження) та форми зондувального сигналу; побудови 2D-зображень усередненої вздовж товщини виробу розсіювальної здатності матеріалу в області сканування циліндричної поверхні у вигляді панорамного зображення С-скану, що відповідає полю контролю $n \times m$, кожна точка якого отримана шляхом усереднення модулів відліків зареєстрованого А-скану по всій реалізації:

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

де N – кількість відліків А-скану; 3D-томографічної реконструкції розсіювальної здатності матеріалу на мезорівні на базі сферичних проекцій з врахуванням діаграми направленості перетворювача.

З математичної точки зору описаний метод зводять до сферичного заникального перетворення Радона.

Для кількісного оцінювання нерівномірності розподілу розсіювальної здатності запропоновано [3] використати параметр, аналогічний відношенню сигнал/шум під час порівняння зображень 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 зображення; $\bar{a} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij}$ –

середнє значення.

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

Позитивна особливість такого підходу до оцінювання нерівномірності розподілу в тому, що відношення (2) практично не залежить від величин a_{ij} , а тільки від нерівномірності їх розподілу.

Очікується, що зі збільшенням розсіювальної здатності (зростанням “шуму”) SNR буде зменшуватися. Отже, менш деградованим ділянкам будуть характерні більші значення параметра SNR .

Оцінювання деградації матеріалу вздовж товщини циліндричного виробу. Оцінювали шляхом обчислення параметра (2) на основі томографічного зображення розсіювальної здатності ультразвуку матеріалом в окремих перерізах вздовж циліндричного виробу по лініях, рівновіддалених від осі циліндра. Обчислення SNR вздовж цих ліній усуває методичну похибку, властиву УЗ томографії на розсіяному сигналі та пов’язану зі зниканням сигналу.

Деградація металу трубопроводу вздовж товщини (від внутрішньої до зовнішньої поверхні) буде змінюватися і супроводжуватиметься при цьому зміною значення SNR . Для трубопроводу без напрацювання (без деградації) така тенденція не повинна спостерігатись, а відношення сигнал/шум має бути вищим, ніж для трубопроводів з напрацюванням.

Розроблено УЗ комп’ютерний томограф на основі реєстрації зворотно розсіяного сигналу для оцінювання розсіювальної здатності металу вздовж товщини трубопроводу (рис. 4).

Рис. 4. Ультразвуковий комп’ютерний томограф для оцінювання розсіювальної здатності металу вздовж товщини трубопроводу.

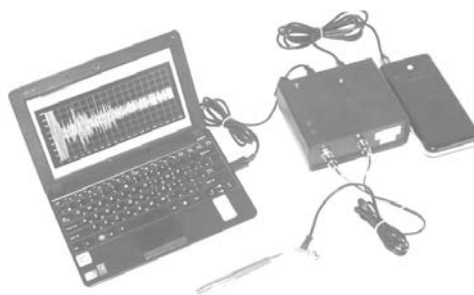


Fig. 4. Ultrasonic computer tomograph for assessing the scattering ability of the metal along the pipeline thickness.

Наведемо результати експериментальної апробації методики оцінювання розсіювальної здатності металу вздовж товщини трубопроводу для двох об’єктів контролю: трубопроводу живильної води другого контуру одного з блоків Рівненської АЕС з напрацюванням $\sim 2,5 \cdot 10^5$ h (рис. 5a, b) та сегмента нового трубопроводу, наданого Рівненською АЕС, метал якого не має напрацювання (рис. 5c, d).

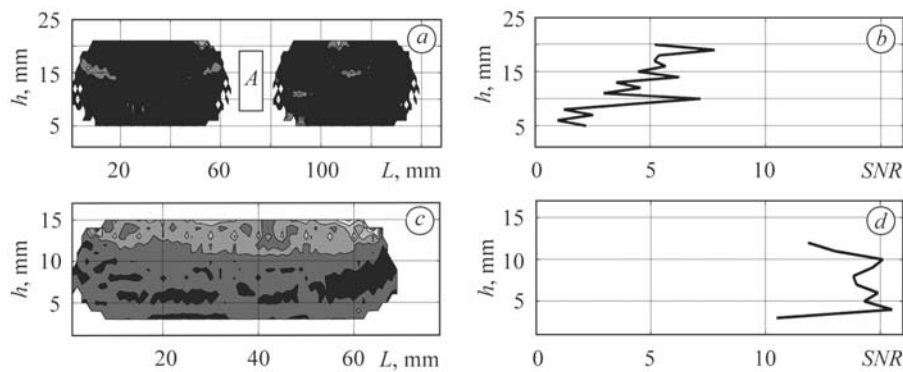


Рис. 5. Томографічні зображення просторового розподілу розсіяної компоненти УЗ сигналу в одному з осьових перерізів трубопроводу живильної води з напрацюванням $\sim 2,5 \cdot 10^5$ h (a), з нульовим напрацюванням (c) та розподіли вздовж товщини параметра SNR (b, d) відповідно. A – зона шва.

Fig. 5. Tomographic images of the spatial distribution of the US signal scattered component in one of axial sections of the pipeline of restoration water with operation time $\sim 2.5 \cdot 10^5$ h (a), without operation time (c) and distributions along the thickness of the parameter SNR (b, d) respectively. A – a weld joint.

Як видно з результатів томографічних експериментів, зміна параметра SNR вздовж товщини стінки трубопроводу з нульовим напрацюванням не має явно виражених тенденцій до зниження або підвищення, відсутня тенденція збільшення SNR від внутрішньої поверхні до зовнішньої, що характерно для об'єктів з напрацюванням, яка свідчить про більш-менш рівномірний просторовий розподіл розсіювальної здатності мікроструктури металу в об'ємі циліндра, оскільки метал ще без експлуатаційного напрацювання, та деградаційні процеси ще не проявилися.

Крім того, як показали експериментальні дослідження, для об'єкта з напрацюванням $\sim 2,5 \cdot 10^5$ h значення параметра SNR знаходиться в межах 2...7 і змінюється від внутрішньої до зовнішньої поверхні трубопроводу, що відображає зміну ступеня деградації металу [8]; для об'єкта без напрацювання – в межах 14...15 і не спостерігається його суттєва зміна вздовж товщини.

Розробка технологій пасивної ультразвукової комп'ютерної томографії.

Розвиток інформаційних технологій призводить до створення інтелектуальних конструкцій, які б під час використання самі себе діагностували, знали про свій стан і приймали рішення про режим експлуатації. Для реалізації таких технологій необхідні потужні методи реєстрації та обробки даних, в т. ч. томографічні.

Очевидно, що для реалізації цих можливостей потрібне застосування принципів побудови пасивних систем, які б самі активізувалися тільки за необхідності і разом з тим були надійні – не пропускали критичні моменти під час експлуатації виробів такі, як виникнення областей пластичної деформації, злиття мікротріщин, зародження макротріщини тощо.

Розроблено метод пасивної ультразвукової комп'ютерної томографії, який базується на синхронній реєстрації акустичних сигналів пасивних або активних джерел багатоканальною приймальною системою з рознесенням у просторі розташуванням приймачів; визначенні часів надходження акустичних сигналів на приймачі багатоканальної приймальної системи; обчисленні координат джерела і часу виникнення акустичного сигналу; обчисленні проєкційних даних – часів поширення акустичних сигналів (усереднених повільностей) від джерел до приймачів багатоканальної приймальної системи; томографічній реконструкції просторового розподілу акустичних характеристик середовища або матеріалу.

За необхідності можливе ітераційне уточнення координат джерел акустичних сигналів та просторового розподілу акустичних характеристик середовища.

Прикладами систем пасивної ультразвукової томографії є системи акустико-емісійної [9] і сейсмічної томографії.

Розроблені ключові технології пасивної ультразвукової комп'ютерної томографії, а саме: визначення часів надходження синхронно зареєстрованих сигналів зі зтягнутим фронтом і наявністю спочатку зареєстрованої часової реалізації значного відрізка шумового сигналу; розрахунок координат джерела і часу виникнення акустичного сигналу, де задачу зводять до системи неоднорідних лінійних алгебричних рівнянь, що дає можливість оцінювати точність визначення координат джерела і час виникнення акустичного сигналу залежно від зареєстрованих часів надходження сигналів і геометрії розташування приймачів багатоканальної приймальної системи; реконструкція просторового розподілу неоднорідностей.

Визначені координати джерела та час виникнення акустичного сигналу як розв'язок системи лінійних алгебричних рівнянь служили нульовим наближенням для ітераційного методу найменших квадратів.

Після визначення часу виникнення акустичного сигналу проводять розрахунок проєкційних даних (часів поширення акустичного сигналу до відповідних приймачів) та томографічну реконструкцію просторового розподілу швидкості

його поширення. Ця реконструкція здійснюється шляхом побудови сумарного зображення, яке є низькочастотною копією шуканого розподілу.

Моделювання технологій пасивної акустичної томографії в цілому показало, що за апіорі відомої простої форми розподілу неоднорідності можна побудувати приймальну систему так, що можна буде реконструювати шуканий просторовий розподіл неоднорідності на основі реєстрації декількох джерел.

Створено експериментальний зразок восьмиканальної системи пасивної УЗ комп'ютерної томографії та проведена апробація розроблених технологій на плиті ($480 \times 640 \times 28$ (mm)) зі зварним з'єднанням. Наведено результати розрахунку джерел акустичних сигналів та реконструйовано зображення просторового розподілу швидкості поширення поздовжньої УЗ хвилі (рис. 6).

Відзначимо, що похибки під час визначення координат джерел акустичних сигналів не перевищували ~ 2 mm. Наведена томограма якісно відповідає розташуванню зварного з'єднання.

Створені безконтактні методи реєстрації УЗ хвиль на шорстких поверхнях та в умовах вібрацій [10], які придатні для застосування в томографічних системах.

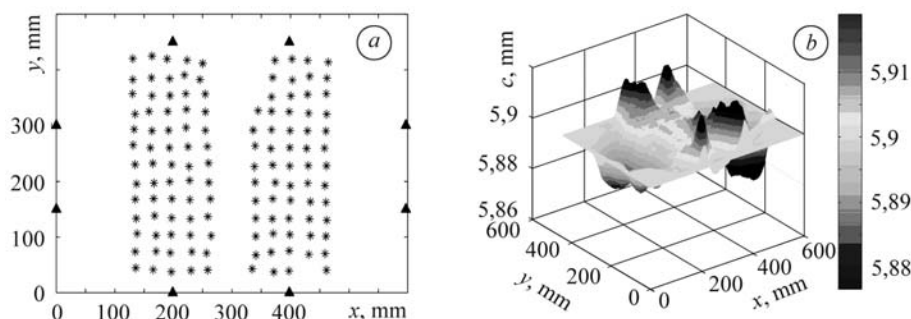


Рис. 6. Результати експериментальної апробації технологій пасивної УЗ комп'ютерної томографії з використанням восьмиканальної системи на плиті ($480 \times 640 \times 28$ (mm)) зі зварним з'єднанням: *a* – координати джерел акустичних сигналів; *b* – реконструйоване зображення швидкості поширення поздовжньої хвилі.

Fig. 6. Results of experimental testing of passive ultrasonic computer techniques using the eight-channels system at the plate ($480 \times 640 \times 28$ (mm)) with a welded joint: *a* – the coordinates of acoustic signals sources; *b* – reconstructed image of a longitudinal wave propagation velocity.

ВИСНОВКИ

Розроблені інформаційно-діагностичні технології та технічні засоби, що функціонують на принципах ультразвукової комп'ютерної томографії, надають можливість експериментально отримувати неруйнівним методом нову діагностичну інформацію, а саме, про об'ємну однорідність властивостей металу у виробках зі зварними з'єднаннями. На основі томографічних технологій запропонована нова неруйнівна методика експериментального оцінювання експлуатаційної деградації металу в об'ємі товстостінних виробів, яка проста для прикладної реалізації, використовує стандартні для ультразвукового контролю засоби і технології вимірювань зворотно розсіяного ультразвукового сигналу, практично не вимагає додаткового устаткування і особливої підготовки об'єкта контролю. Запропонована нова концепція побудови travel-time томографічних систем на принципах пасивної томографії, основною перевагою якої є відмова від багатократного прецизійного вимірювання координат джерел-приймачів під час сканування виробу, що суттєво спрощує прикладну реалізацію томографічних технологій. Розроблені безконтактні методи реєстрації ультразвукових хвиль на шорстких поверхнях та в умовах вібрацій, які придатні для застосування в томографічних системах.

РЕЗЮМЕ. Показаны достижения ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины в развитии методов и средств ультразвуковой компьютерной томографии конструкционных материалов в течение последнего десятилетия. Приведены результаты исследований качества сварных соединений в толстолистовых изделиях с помощью трансмиссионного ультразвукового компьютерного томографа. Описано технологии оценки деградации металла по толщине толстостенных трубопроводов с помощью ультразвукового компьютерного томографа на основе регистрации рассеянного ультразвукового сигнала, которые имеют перспективу внедрения на объектах АЭС. Приведены результаты экспериментальной апробации технологий пассивной ультразвуковой компьютерной томографии.

SUMMARY. The achievements in the development of the methods and devices of ultrasonic computer tomography of structural materials obtained in the last decade at Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine are described. The results of investigation of the quality of welds in the thick-sheet products by transmission ultrasonic computer tomography are presented. The technologies of degradation evaluation along the metal thickness of the thick-walled pipe using ultrasonic computer tomography on the basis of recording of a scattered ultrasonic signal, with the prospect of their implementation at NPP are described. The results of the experimental testing of passive ultrasonic computer tomography are presented.

1. *Оцінка однорідності металу зварних з'єднань засобами ультразвукової комп'ютерної томографії* / В. В. Кошовий, О. Є. Левицький, І. М. Романишин, Р. В. Шараміга // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – **43**, № 4. – С. 71–84.
(*Koshovyi V. V., Levyts'kyi O. E., Romanyshyn I. M., and Sharamaha R. V. Evaluation of the Homogeneity of the Metal of Welded Joints by Ultrasonic Computed Tomography // Materials Science. – 2007. – 43, № 3. – P. 528–542.*)
2. *Лебедев А. А.* Новые характеристики деградации материала на стадии развития рассеянных повреждений // Техн. диагностика и неразр. контроль. – 2008. – № 4. – С. 35–44.
3. *Патент* України на корисну модель № 44165. Спосіб оцінки деградації матеріалу на основі томографічних зображень / В. В. Кошовий, І. М. Романишин, Р. І. Романишин та ін. – Опубл. 25.09.2009, Бюл. № 18.
4. *Оценка деградации в объеме материала на основе ультразвуковой томографии при регистрации рассеянного сигнала* / В. В. Кошевой, И. М. Романишин, Р. И. Романишин, Р. В. Шарамига // Дефектоскопия. – 2010. – № 9. – С. 33–49.
(*Evaluation of material degradation on the basis of ultrasonic tomography during the detection of scattered signals / V. Koshevoi, I. Romanishin, R. Romanishin, R. Sharamaga // Russian J. of Nondestructive Testing. – 2010. – 46, № 9. – P. 651–663.*)
5. *Панин В. Е.* Современные проблемы пластичности и прочности твердых тел // Изв. высш. уч. заведений. Физика. – 1998. – № 1. – С. 7–34.
6. *Розробка технологій ультразвукової томографії на основі реєстрації розсіяного сигналу для контролю циліндричних виробів* / В. В. Кошовий, М. А. Шама, І. М. Романишин та ін. // Металлофизика и новейшие технологии. – 2008. – **30**. Спецвип., грудень. – С. 677–687.
7. *Ультразвуковая компьютерная томография на основе регистрации рассеянного структурой материала сигнала* / В. В. Кошевой, И. М. Романишин, Р. И. Романишин, Р. В. Шарамига // Техн. диагностика и неразр. контроль. – 2010. – № 2 (3). – С. 37–42 (19–24).
8. *Високотемпературна тріщиностійкість литої сталі труб печей риформінгу* / Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, І. Д. Скрипник // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1990. – № 2. – С. 68–74.
9. *Schubert F.* Basic principles of acoustic emission tomography // J. Acoustic Emission. – 2004. – **22**. – P. 147–158.
10. *Stabilized detection scheme of surface acoustic waves by Michelson interferometer* / О. Mokryy, V. Koshovyy, I. Romanyshyn, R. Sharamaga // Optica Applicata. – 2010. – **XL**, № 2. – P. 449–458.

Одержано 07.04.2011