

УЛЬТРАЗВУКОВИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ РОЗСІЯНОЇ ПОШКОДЖЕНОСТІ МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ ЗВОРОТНО-РОЗСІЯНОГО СИГНАЛУ

Р. І. РОМАНИШИН, Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ, В. В. КОШОВИЙ, С. Т. ШТАЮРА, І. М. РОМАНИШИН,
О. М. МОКРИЙ, П. М. СЕМАК

Фізико-механічний інститут НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: pminasu@lviv.ua

Запропоновано неруйнівний метод оцінювання розсіяної пошкодженості в об'ємі матеріалу на основі реєстрації зворотно-розсіяного ультразвукового сигналу у вигляді А-скану. Викладені інформаційні технології обробки зворотно-розсіяного сигналу та результати експериментальної апробації на зразках з різним ступенем водневої пошкодженості. Бібліогр. 25, рис. 4.

Ключові слова: розсіяна пошкодженість, ультразвуковий зворотно-розсіяний сигнал, статистична обробка, дисперсія, В-скан

В даний час актуальною задачею є оцінювання розсіяної пошкодженості (деградації) матеріалу неруйнівними методами [1]. Переважно пошкодженість матеріалу пов'язують з виникненням мікродефектів (мікропор, мікротріщин), їх об'єднанням до виникнення макродефекту [2–9].

Для кількісного оцінювання розсіяної пошкодженості Ю. М. Работновим введено параметр D [в оригіналі ω], який є площею пор (тріщин) на одиницю площі поперечного перерізу в даний момент часу, тобто відношенням площі пор до площі поперечного перерізу [10, 11]. Іншими словами така величина є «дефектом площі» [5, 6] (відносною зміною площі поперечного перерізу внаслідок виникнення пор [10]):

$$D = (S_0 - S)/S_0, \quad (1)$$

де S_0 – площа поперечного перерізу при відсутності пошкодження; S – «ефективна площа» цього ж перерізу (за виключенням сумарної площі пошкоджених); $S_0 - S$ – площа пошкоджених.

Для непошкодженого матеріалу $D = 0$. Із зростанням пошкодженості D зростає до 1. В момент руйнування $D(t = T_{cr}) = 1$.

Для оцінювання пошкодженості Л. М. Качановим запропонований структурний параметр суцільності ψ , який характеризує мікродефектність структури [12]. При «відсутності пошкодженості» $\psi = 1$. Зі зростанням пошкодженості ψ спадає до нуля. Можна вважати, що $D = 1 - \psi$.

Слід відмітити, що є різні матеріалознавчі інтерпретації пошкодженості.

Одна з інтерпретацій стосується того, що з ростом пошкодженості зменшується опір матеріалу розтягуючим напруженням. При оцінюванні пошкодженості на основі відношення площі пор до загальної (початкової) площі поперечного пере-

різу (1) збільшення пошкодженості супроводжується збільшенням площі пор. В результаті цього зменшується ефективна площа поперечного перерізу, яка реально несе розтягуюче навантаження, і це приводить до зменшення опору матеріалу розтягу.

Інша інтерпретація стосується скорочення пружного відгуку тіла з ростом пошкодженості. Середнє напруження в перерізі при зовнішньому нормальному напруженні σ_0 зростає із зростанням пошкодженості матеріалу [10]:

$$\sigma = \sigma_0 / (1 - D) \quad (2)$$

так як в пошкодженому матеріалі $0 < D < 1$.

Це приводить до скорочення пружного відгуку тіла внаслідок зменшення ефективної площі, яка передає внутрішні зусилля від однієї частини тіла до іншої, що, в свою чергу, обумовлює появу і розвиток розсіяного поля мікродефектів (мікротріщин – при пружній деформації, дислокацій – при пластичній, мікропор – при повзучості, поверхневих мікротріщин – при втомі [13]).

Для експериментального оцінювання пошкодженості найширше використовуються методи, які базуються на визначенні об'ємної густини металу [7].

Накопичення мікродефектів в металі (зростання пористості) приводить до зниження його густини. Тому найпростішим методом дослідження пошкодженості є прецизійне зважування. Практика показує, що в цьому випадку для визначення густини металу методом гідростатичного зважування необхідна точність зважування до $\pm 0,0001$ г на зразках-вирізках від 5 до 20 г [7].

Отриману густину металу необхідно співставити з його густиною у вихідному стані і в момент руйнування. Так, густина сталі 12Х1МФ у вихідному стані 7,835, а в момент руйнуван-

ня $7,778 \text{ г/см}^3$, тобто «дефект» густини при руйнуванні сталі всього $1 \dots 1,25 \%$ [7]. Це вимагає високої точності зважування при проведенні експерименту.

Для експериментального оцінювання пошкодженості матеріалу використовують відносні зміни параметрів, які чутливі до накопичення пошкоджень [6]. Надано узагальнений параметр для оцінки пошкодженості у вигляді відносної зміни деякого параметра, чутливого до пошкодженості:

$$\Delta W = 1 - P_d/P_0, \quad (3)$$

де P_d – параметр для матеріалу з пошкодженням; P_0 – параметр для непошкодженого матеріалу.

До параметрів, чутливих до накопичення пошкоджень, відносять густину, модулі пружності, акусто-емісійні параметри [5, 6].

При цьому говорять про «дефект густини», «дефект модуля пружності» та інші «дефекти...», розуміючи під цим відносні зміни параметрів через пошкодженість.

Зауважимо, що «дефект» густини еквівалентний «дефекту» об'єму (відносній зміні об'єму) зі знаком мінус [14].

Традиційно ультразвукові методи оцінювання стану металу (пошкодженості) базуються на вимірюванні швидкості поширення ультразвукової хвилі [15].

Відносні зміни швидкості ультразвуку при діагностиці напружень складають соті долі процента, а при діагностиці структурних змін – десятки долі процента [15]. Це накладає жорсткі вимоги на точність вимірювання швидкості, а також свідчить про низьку чутливість цих підходів.

В 1970-х рр. отримані перші експериментальні дані про те, що в процесі накопичення втомних пошкоджень зміна мікроструктури металу може призводити до багатократного росту акустичної нелінійності [16]. При цьому може мати місце якісна модифікація нелінійних ефектів.

Висока «структурна чутливість» акустичної нелінійності часто спостерігається вже на початковій стадії пошкодження матеріалу при ще майже незмінних лінійних пружних модулях [16]. На цій стадії традиційні методи на основі змін швидкості пружних хвиль ще не дозволяють виявити і оцінити пошкодженість металу.

Причиною сильного зростання акустичної нелінійності мікронеоднорідних середовищ в більшості випадків є наявність в структурі середовища компонентів з різко контрастними лінійними пружними властивостями. Причому розмір м'яких включень-дефектів малий порівняно з довжиною пружної хвилі, а також мала концентрація цих включень.

Прикладами таких контрастно-м'яких дефектів є тріщини, міжзеренні контакти, накопичення дислокацій по границях зерен полікриста-

лів [16]. Ці мікродефекти є також розсіювачами ультразвуку.

Ультразвуковий метод оцінювання пошкодженості матеріалу на основі зворотно-розсіяного сигналу ґрунтується на наступних закономірностях, експериментально перевірених фактах і гіпотезах:

- деградація матеріалів в процесі експлуатації супроводжується структурними змінами, які призводять до формування і розвитку розсіяної пошкодженості матеріалу в об'ємі виробу і проявляються у збільшенні розкиду фізико-механічних характеристик матеріалу [2, 4, 8, 9];

- місця з підвищеною розсіяною пошкодженістю матеріалу є найбільш ймовірними щодо виникнення дефектів;

- одним з найчутливіших сигналів до структурних змін в матеріалі (розсіяної пошкодженості) на мезорівні (порядка довжини зондуєчої хвилі) є розсіяний ультразвуковий сигнал;

- при збільшенні розсіяної пошкодженості матеріалу інтенсивність розсіювання (в т. ч. зворотного) ультразвуку зростає.

Однією з перших робіт, в якій приведені експериментально зареєстровані осцилограми зворотно-розсіяного сигналу на зразках з водневою пошкодженістю і непошкоджених, є робота [17]. Автори роботи стверджують, що всі попередні роботи по оцінюванню впливу водневої пошкодженості ультразвуковими методами обмежувались вимірюванням швидкості і загасання, зворотне розсіювання не використовувалось. Воно використовувалось, в основному, для визначення розміру зерна в неруйнівному контролі (1989 р.). Як впливає з роботи [17], амплітуда зворотно-розсіяного сигналу на частоті 10 МГц в результаті водневої пошкодженості зростає в $7 \dots 12$ разів.

Ультразвуковому дослідженню пошкодженості сталей (на прикладі водневої пошкодженості) присвячена робота [18].

Огляд методів виявлення та оцінювання наводненості в сталях приведено в статті [19].

В роботі [20] приведені В-скани пошкодженого матеріалу на основі сканування об'єктів за допомогою ультразвукової решітки.

Таким чином, експериментальні дослідження експлуатованих об'єктів свідчать про перспективність застосування зворотно-розсіяного сигналу для оцінювання пошкодженості сталей, який зростає в рази (на прикладі водневої пошкодженості). В той же час в літературі приведені тільки якісні результати, отримані на основі реєстрації зворотно-розсіяного сигналу. Зворотно-розсіяний сигнал, як правило, слабкий, шумоподібний (і зашумлений). Крім того, його рівень залежить від рівня зондуєчого сигналу, акустичного контакту, підсилення приймального тракту, апаратурних завад,

загасання в процесі поширення тощо. Тому актуальною задачею є розробка інформаційної технології обробки зворотно-розсіяного сигналу, яка би враховувала ці завади.

Попередня обробка зареєстрованого прямим роздільно сумішеним п'єзоперетворювачем ультразвукового сигналу у вигляді А-скану забезпечує врахування технічних характеристик передавально-приймального тракту, а саме частоти зондування і дискретизації, розрядності АЦП, постійної складової (або низькочастотного тренду). На цьому етапі проводиться виділення інформативної частини зареєстрованого сигналу, що відповідає розсіюванню по шляху першого поширення зонduючого сигналу від ультразвукового давача до відбиваючої донної поверхні, а в часовій області від кінця імпульсу, відбитого від границі призма-метал, до початку першого донного відбитого луно-сигналу.

При поширенні високочастотного (10 МГц) зонduючого ультразвукового сигналу в матеріалі здійснюється амплітудна модуляція сигналу неоднорідностями середовища і, в першу чергу, пошкодженістю. Тому для визначення рівня пошкодженості необхідно здійснити демодуляцію сигналу.

Маємо зареєстровану реалізацію А-скану $s_i^{reg} = s_i + n_i, i = 1, \dots, N$, де N – загальна кількість відліків; s_i – зворотно-розсіяний сигнал; n_i – адитивна шумова складова (апаратні шуми), якої позбуваються шляхом багатократної реєстрації і усереднення реалізацій:

$$\bar{s}_i^{reg} = \bar{s}_i + \bar{n}_i \Big|_{\bar{n}_i \rightarrow 0, at K \rightarrow \infty}, i = 1, \dots, N, \quad (4)$$

де K – кількість зареєстрованих реалізацій в одній «точці» (для усереднення і усунення апаратних шумів).

На першому етапі здійснюється демодуляція зареєстрованого сигналу:

$$S_i = \frac{1}{\Delta_t} \sum_{n=i-\frac{\Delta_t}{2}+1}^{n=i+\frac{\Delta_t}{2}} \left(\frac{s_n - s^0}{A} \right)^2, \quad (5)$$

де $i = Int(\Delta_t / 2), \dots, N - Int(\Delta_t / 2)$, $\Delta_t = Int(\Omega / \omega)$ – тривалість зонduючого імпульсу (у відліках); ω – частота зондування (10 МГц); Ω – частота дискретизації (68 МГц); N – тривалість реалізації у відліках (2^{11}); s_n – n -ий відлік зареєстрованого сигналу; s^0 – постійна складова (512); A – розмах сигналу для заданої розрядності АЦП ($2^{10} = 1024$).

Слід зауважити, що приведене детектування є обчисленням автокореляційної функції шумоподібного модульованого сигналу при нульовій затримці, що є енергетичною характеристикою (дисперсією) сигналу.

Крім того, при обчисленні автокореляції синусоїдального функції на основі скінченного числа даних виникає похибка із-за скінченності числа

(«урізання») даних. В цьому випадку для синусоїдального сигналу автокореляцію можна представити у вигляді двох складових: «правильної» автокореляції (як такої, що отримується на основі нескінченного числа даних) та «похибки», яка виникає із-за «урізання» даних [21]. Ця складова дорівнює нулю, коли інтервал, впродовж якого обчислюється «урізана» автокореляція, співпадає або кратний періоду синусоїдального сигналу.

Таким чином, усереднення інтенсивності на періоді несучої забезпечує практично відсутність похибки автокореляції із-за «урізання» даних.

Інтенсивність зареєстрованого сигналу (5) залежить не тільки від розсіювальної здатності матеріалу (наприклад, перерізу зворотного розсіювання), але часто в значно більшій мірі від вхідного сигналу, акустичного контакту і підсилення приймального тракту.

Розроблено метод обробки зворотно-розсіяного сигналу, який враховує рівень зонduючого сигналу, вплив акустичного контакту, підсилення приймального тракту, загасання сигналу в процесі поширення, базується на нормуванні кожного відліку інтенсивності зареєстрованого сигналу (5) до «введеної» енергії зонduючого імпульсу і дозволяє отримати профіль перерізу зворотного розсіювання по шляху поширення сигналу.

Такий підхід справедливий при наступних припущеннях.

Енергетичну модель зареєстрованого сигналу, представлену для інтенсивності, можна подати у вигляді добутку коефіцієнта, який характеризує вплив акустичного контакту і підсилення приймального тракту, на інтенсивність сигналу, коли цей коефіцієнт дорівнює одиниці:

$$S_i = F_{cont} S_i^{pr}, \quad (6)$$

де $i = 1, \dots$. Тут S_i^{pr} – інтенсивність розсіювання, яка характеризує розсіювальні властивості матеріалу і не залежить від акустичного контакту і підсилення приймального тракту.

Оцінимо вплив акустичного контакту і підсилення приймального тракту, тобто коефіцієнт F_{cont} . Проводиться зондування плоскопаралельного об'єкту прямим роздільно сумішеним п'єзоперетворювачем з реєстрацією А-скану. Зауважимо, що у випадку, коли коефіцієнт відбивання від «дна» близький до одиниці (тобто велика різниця імпедансів зондованого матеріалу (металу) і зовнішнього середовища), то практично вся енергія введеного зонduючого сигналу за один цикл (в часовій області від початку імпульсу, відбитого від границі призма-метал, до кінця першого донного відбитого імпульсу) повертається до п'єзоперетворювача. Просумуємо відліки (6) на інтервалі циклу при $i \in [i_0 - \Delta/2, i_n + \Delta/2]$ і отримаємо:

$$\sum_{i=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_i = F_{cont} \sum_{i=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_i^{pr}, \quad (7)$$

де Δ – тривалість зонduючого радіоімпульсу; i_0 – час приходу імпульсу, відбитого від границі призма-метал; i_n – час приходу першого донного відбитого сигналу (рис. 1).

Інтенсивність зворотного-розсіяного сигналу S_i^{pr} у випадку плоскої падаючої хвилі одичної амплітуди називають перерізом зворотного розсіювання [22].

У випадку плоскої падаючої хвилі одичної амплітуди енергія зонduючого імпульсу одична, тобто

$$\sum_{i=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_i^{pr} = 1 \quad (8)$$

На основі (6) з врахуванням (7) маємо:

$$S_i^{pr} = \frac{S_i}{\sum_{i=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_i} \quad (9)$$

Тобто для врахування рівня зонduючого сигналу, впливу акустичного контакту, підсилення приймального тракту кожний відлік інтенсивності, визначений на основі зареєстрованого сигналу шляхом демодуляції (5), необхідно поділити на енергію зонduючого імпульсу.

Даний метод експериментально апробувався шляхом зміни підсилення приймального тракту.

На рис. 1, а приведено приклад інтенсивностей сигналу (5), зареєстрованого в одній точці при різному підсиленні приймального тракту (кожен графік відповідає певному підсиленню).

На рис. 1, б приведені нормовані (до «введеної енергії») інтенсивності цих же сигналів (при різному підсиленні приймального тракту), отримані на основі (9) з демодульованої інтенсивності зареєстрованого сигналу (5) (рис. 1, а).

Як видно з рис. 1, інтенсивність зареєстрованого сигналу (5) змінюється в залежності від підсилення приймального тракту, в той же час нормована інтенсивність зареєстрованого сигналу до «введеної енергії» при різному підсиленні приймального тракту, розрахована на основі (9), практично не залежить від рівня підсилення.

У випадку врахування загасання зонduючого сигналу в процесі поширення кожний відлік (9) необхідно коригувати, враховуючи, що до i -ого відліку частина енергії розсіялась. Зокрема, до i -ого відліку розсіяна енергія становить:

$$S_{\left[i_0-\frac{\Delta}{2}, i-1\right]} = \sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i-1} S_n \quad (10)$$

Зонduючий сигнал, який «дійшов» до місця, що відповідає i -ому відліку характеризується «запасом енергії»:

$$S_{\left[i, i_H+\frac{\Delta}{2}\right]} = \sum_{n=i}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_n = \sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_n - \sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i-1} S_n =$$

$$= \sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_n \left(1 - \frac{\sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i-1} S_n}{\sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_n} \right) \quad (11)$$

Для приведення кожної «точки» шляху поширення сигналу в однакові умови («одичного зонduючого сигналу») необхідно провести коригування відліків:

$$S_i^{pr*} = \frac{S_i}{\sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_n \left(1 - \frac{\sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i-1} S_n}{\sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_n} \right)} \quad (12)$$

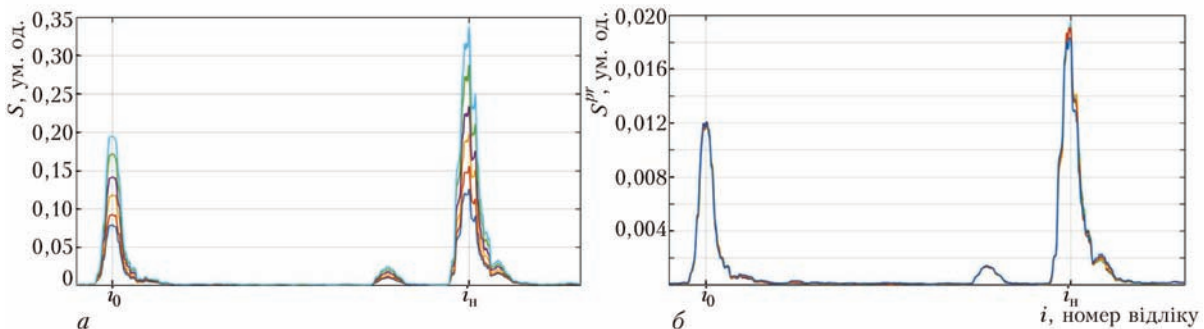


Рис. 1. Інтенсивність зареєстрованого в одній точці сигналу при різному підсиленні приймального тракту (5) (а) та нормована інтенсивність (9) (б)

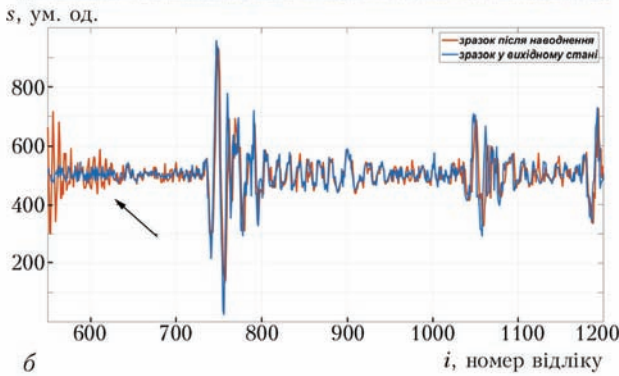
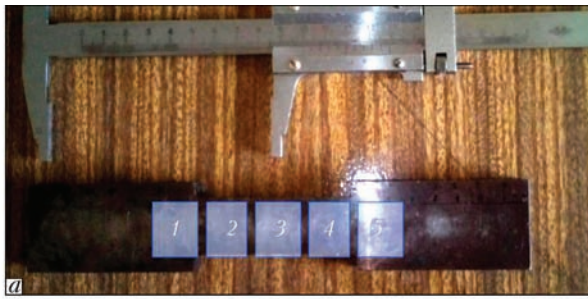


Рис. 2. Розбиття зразка на зони (а) та зареєстровані зворотньо-розсіяні сигнали на наводненому і ненаводненому зразках (б)

В результаті отримаємо оцінку перерізу зворотного розсіювання вздовж шляху поширення зондуючого сигналу.

Проведені експериментальні дослідження пошкодженості металу внаслідок сумісної дії водню і деформації.

Для дослідження нерівномірності пошкодженості вздовж зразка «робоча» частина зразка довжиною 100 мм розбивалась на 5 зон (рис. 2, а). В

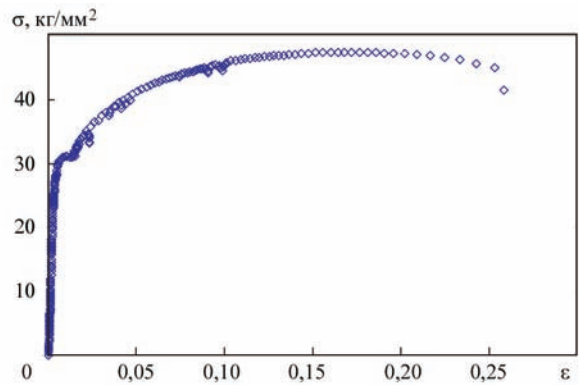


Рис. 3. Діаграма деформування сталі 09Г2С

кожній зоні проводилась реєстрація зворотньо-розсіяного сигналу з кроком 2 мм.

На рис. 2, б приведено приклад зареєстрованих сигналів на наводненому зразку та зразку у вихідному стані (тут стрілкою відмічене зростання зворотньо-розсіяного сигналу на наводненому зразку, яке може бути обумовлене пошкодженістю матеріалу).

Дослідження пошкодженості металу внаслідок сумісної дії водню і деформації проводились в наступному порядку.

Спочатку зразок зі сталі 09Г2С (рис. 2, а) витримали у водні під тиском 5 МПа за температури 420 °С протягом 4 годин. Після цього проводили реєстрацію і обробку зворотньо-розсіяного сигналу (рис. 4, а, б).

Потім зразок деформували розтягом на 19 %, що відповідало рівню границі міцності, коли починається локалізація деформації зразка з утворенням шийки (рис. 3), та повторно наводнювали в такому ж режимі, як і в попередньому випадку, і

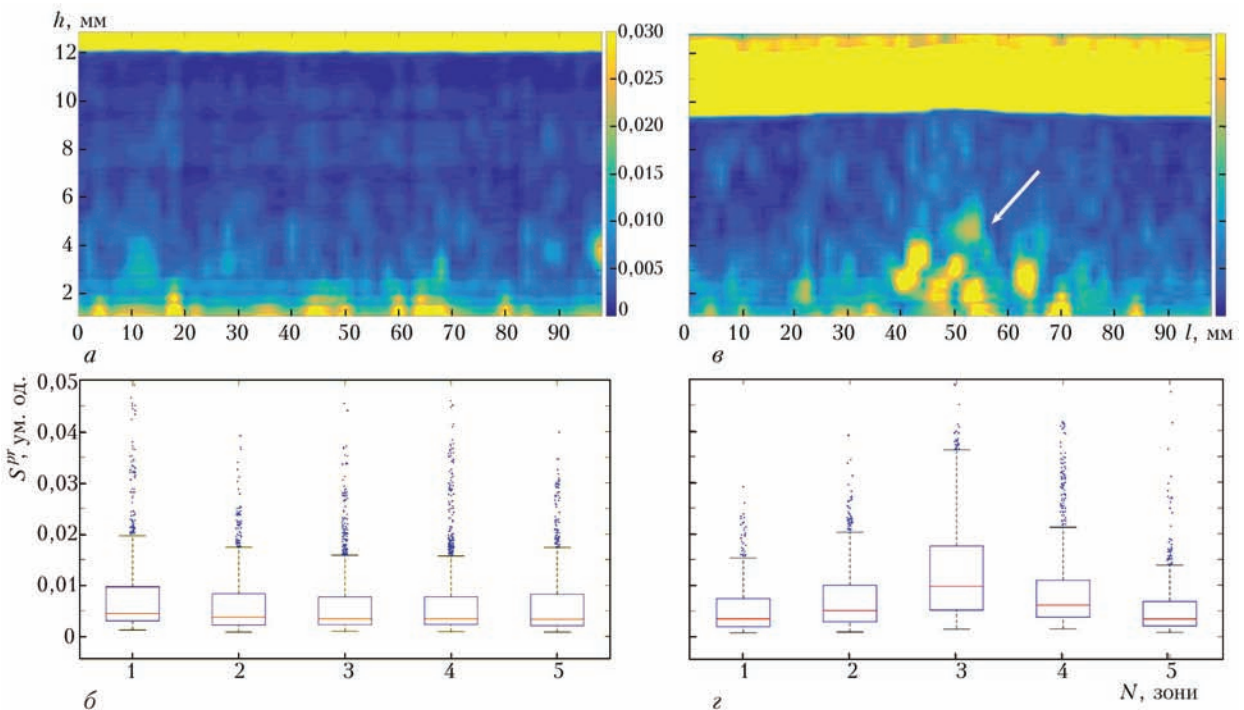


Рис. 4. Просторовий та статистичний розподіли параметрів зворотньо-розсіяного сигналу, зареєстрованих на зразку після наводнювання (а, б), деформації та повторного наводнювання (в, г)

проводили реєстрацію і обробку зворотно-розсіяного сигналу (рис. 4 в, з).

На рис. 4, а, в приведені В-скани [23] після кожного наводнювання.

Як слідує з експериментів, перше наводнювання і деформація призвели до збільшення розсіяної пошкодженості достатньо рівномірно в об'ємі зразка (рис. 4, а).

Після повторного наводнювання деформованого зразка зареєстровано значне збільшення зворотно-розсіяного сигналу в центральній частині робочої довжини зразка. Просторовий розподіл розсіяної пошкодженості став симетричним у відповідності до деформації (рис. 4, в). Це може свідчити про те, що наводнювання інтенсифікує пошкодженість попередньо деформованого металу, особливо в місці можливого утворення шийки в зразку. Цим продемонстровано можливість діагностування початкового етапу локалізації пластичної деформації і, відповідно, спричиненої воднем пошкодженості. Такий ефект подібний до явища синергізму [24] – водень значно підвищив рівень пошкодженості після деформації.

На основі зображення В-скану можна оцінювати площу пошкоджених на одиницю площі поперечного перерізу і знаходити параметр пошкодженості (1).

На рис. 4, б, з приведені результати статистичного розподілу інтенсивності зворотно-розсіяного сигналу (9) на проміжку $i \in [i_0 - \Delta/2, i_n + \Delta/2]$ (тобто від кінця імпульсу, відбитого від границі призма-метал, до початку першого донного відбитого сигналу) в кожній з п'яти областей зразка після наводнювання (рис. 4, б) та деформації і повторного наводнювання (рис. 4, з) у вигляді коробчастих діаграм [25]. Коробчасті діаграми відповідають приведеним В-сканам і дають параметри (наприклад, медіани, квартилі) для кількісної оцінки пошкодженості по поверхні зразка, які відображені якісно у вигляді В-сканів. Так після першого наводнювання (рис. 4, б) медіанне значення інтенсивності для кожної із зон лежить в околі 0,005 ум. од. Після деформації і повторного наводнювання медіанне значення інтенсивності по поверхні зразка відображає «параболічний» закон деформації при розтягу зразка з максимумом посередині зразка, який досягає значення 0,01 ум. од.

Інтегральними інформативними параметрами про ступінь пошкодженості матеріалу в «точці» реєстрації зворотно-розсіяного сигналу може бути дисперсія зворотно-розсіяного сигналу (усереднене на проміжку $[N_1, N_2]$ значення інтенсивності):

$$Disp = \sum_{i=N_1}^{N_2} \frac{1}{N_2 - N_1 + 1} S_i^{pr} \quad (13)$$

а також її розкид. Проміжок $[N_1, N_2]$ відповідає зворотно-розсіяному сигналу, тобто N_1 – кінець

імпульсу, відбитого від границі призма-метал; N_2 – початок донного відбитого сигналу.

Заключення

Розроблено та експериментально апробовано ультразвуковий метод оцінювання розсіяної пошкодженості матеріалу на основі сканування поверхні зразка прямим роздільно суміщеним перетворювачем, багатократної реєстрації і статистичної обробки зворотно-розсіяних ультразвукових сигналів. Запропоновано використати в якості інформативного параметра про рівень розсіяної пошкодженості дисперсію зворотно-розсіяного сигналу. Експериментально отримано, що просторовий розподіл дисперсії зворотно-розсіяних ультразвукових сигналів, отриманий при скануванні поверхні зразка після наводнювання – деформації – повторного наводнювання добре відповідає розподілу деформації матеріалу.

Список літератури

1. Родюшкин В. М. (2009) От поиска дефектов к поиску преддефектного состояния. *Вестник научно-технического развития*, **4**, 51–56.
2. Козинкина А. И., Рыбакова Л. М., Березин А. В. (2006) Оценка степени микроразрушений при деформации металлических материалов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, **72**, **4**, 39–42.
3. Бобырь Н. И., Бабенко А. Е., Халимон А. П. (2008) Континуальная механика поврежденности и ее использование в задачах сложного малоциклового нагружения. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 25–34.
4. Лебедев А. А. (2008) Новые характеристики деградации материала на стадии развития рассеянных повреждений. *Там же*, **4**, 35–44.
5. Недосека С. А., Недосека А. Я. (2010) Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой. *Там же*, **1**, 9–16.
6. Недосека С. А. (2010.) Диагностика і прогнозування ресурсу зварних конструкцій методом акустичної емісії. АР-дра техн. наук по спец. 05.02.10 «Діагностика матеріалів і конструкцій», ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України, Київ.
7. Векслер Е. Я., Замекула И. В., Толстов В. Ю., Семешко Е. В. (2010) Технология диагностирования и оценка остаточного ресурса паропроводов высокого давления тепловых электростанций по уровню микроповрежденности металла. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 23–31.
8. Мишакин В. В., Клошников В. А., Гончар А. В. (2015) Связь энергии деформации с коэффициентом Пуассона при циклическом нагружении аустенитной стали. *Журнал технической физики*, **85**, вып. 5, 32–36.
9. Петров А. И., Разуваева М. В. (2015) Оценка критерия взаимодействия пор в деформированных материалах. *Там же*, **85**, вып. 4, 130–133.
10. Степанова Л. В., Игонин С. А. (2014) Описание рассеянного разрушения: параметр поврежденности Ю. Н. Работнова: историческая справка, фундаментальные результаты и современное состояние. *Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия*, **3** (114), 97–114.
11. Работнов Ю. Н. (1959) О механизме длительного разрушения. *Вопросы прочности материалов и конструкций*. Москва, Изд-во АН СССР, сс. 5–7.
12. Качанов Л. М. (1958) О времени разрушения в условиях ползучести. *Изв. АН СССР. ОТИ*, сс. 26–31.
13. Ерофеев В. И., Никитина Е. А. (2010) Самосогласованная динамическая задача оценки поврежденности материала акустическим методом. *Акустический журнал*, **56**, **4**, 554–557.

14. Каштанов А. В., Петров Ю. В. (2006) Энергетический подход к определению мгновенной поврежденности. *Журнал технической физики*, **76**, вып. 5, 71–75.
15. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. (1996) *Скорость звука и структура стали и сплавов*. Москва, Наука.
16. Зайцев В. Ю., Назаров В. Е., Таланов В. И. (2006) «Неклассические» проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики. *Успехи физических наук*, **1**, 97–102.
17. Birring A. S., Bartlett M. L., Kawano K. (1989) Ultrasonic Detection of Hydrogen Attack in Steels. *Corrosion (National Association of Corrosion Engineers)*, **45**, 3.
18. Hirsekorn S., Van Andel P. W., Netzelmann U. (1998) Ultrasonic Methods to Detect and Evaluate Damage in Steel. *NDT & E.*, **15:6**, 373–393;
19. Kot R. (2001) *Hydrogen Attack, Detection, Assessment and Evaluation. 10th APCNDT*. <http://www.ndt.net/apcndt2001/papers/1154/1154.htm>
20. Molika Nardo R., Cerniglia D., Lombardo P. et al. (2016) Detection, characterization and sizing of hydrogen induced cracking in pressure vessels using phased array ultrasonic data processing. *21st European Conference on Fracture, ECF21, 20–24 June 2016, Catania, Italy*. *Procedia Structured Integrity*, **2**, 581–588.
21. <http://www.williamsublishing.com/PDF/5-8459-0710-1/part.pdf>.
22. Исмару А. (1981) *Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах*. т. 1. Москва, Мир.
23. Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потапов А. И. (1991) Кн. 2. Акустические методы контроля: практ. пособие. Сухоруков В. В. (ред.) *Неразрушающий контроль*. В 5 кн. Москва, Высшая школа.
24. Спивак Л. В. (2008) Синергические эффекты деформационного отклика в термодинамически открытых системах металл-водород. *Успехи физических наук*, **178**, **9**, 897–922.
25. <http://energyfirefox.blogspot.com/2012/02/boxplot.html>.

References

1. Rodyushkin V. M. (2009) ot poiska defektov k poisku preddefektnogo sostoyaniya. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, **4**, 51–56.
2. Kozinkina A. I., Rybakova L. M., Berezin A. V. (2006) Otsenka stepeni mikrorazrusheniya pri deformatsii metallicheskikh materialov. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, **72**, **4**, 39–42.
3. Bobyr N. I., Babenko A. Ye., Khalimon A. P. (2008) Kontinualnaya mekhanika povrezhdennosti i yee ispolzovaniye v zadachakh slozhnogo malotsiklovogo nagruzheniya. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchy kontrol*, **4**, 25–34.
4. Lebedev A. A. (2008) Novye kharakteristiki degradatsii materiala na stadii razvitiya rasseyannykh povrezhdeniy. *Tam zhe*, **4**, 35–44.
5. Nedoseka S. A., Nedoseka A. Ya. (2010) . Integrated assessment of damage level and residual life of metals with certain operating life. *Tam zhe*, **1**, 9–16.
6. Nedosiaka S. A. (2010.) Diahnostyka i prohnozuvannia resursu zvarykh konstrukttsii metodom akustychnoi emisii. AR d-ra tekhn. nauk po spets. 05.02.10 «Diahnostyka materialiv i konstrukttsii», IEZ im. Ye. O. Patona NAN Ukrainy, Kyiv.
7. Veksler Ye. Ya., Zamekula I. V., Tolstov V. Yu., Semeshko Ye. V. (2010) Technology of diagnostics and assessment of residual life of high-pressure steam pipelines of thermal power plants by the level of metal microdamage. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchy kontrol*, **1**, 23–31.
8. Mishakin V. V., Klyushnikov V. A., Gonchar A. V. (2015) Svyaz energii deformatsii s koeffitsiyentom Puassona pri tsiklicheskom nagruzhenii austenitnoy stali. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, **85**, вып. 5, 32–36.
9. Petrov A. I., Razuvayeva M. V. (2015) Otsenka kriteriya vzaimodeystviya por v deformirovannykh materialakh. *Tam zhe*, **85**, вып. 4, 130–133.
10. Stepanova L. V., Igonin S. A. (2014) Opisaniye rasseyannogo razrusheniya: parametr povrezhdennosti Yu. N. Rabotnova: istoricheskaya spravka, fundamentalnye rezultaty i sovremennoye sostoyaniye. *Vestnik SamGU – Yestestvenno-nauchnaya seriya*, **3(114)**, 97–114.
11. Rabotnov Yu. N. (1959) O mekhanizme dlitel'nogo razrusheniya. *Voprosy prochnosti materialov i konstrukttsy*. Moskva, Izd-vo AN SSSR, ss. 5–7.
12. Kachanov L. M. (1958) O vremeni razrusheniya v usloviyakh polzuchesti. *Izv. AN SSSR. OTN*, ss. 26–31.
13. Yerofeyev V. I., Nikitina Ye. A. (2010) Samosoglasovannaya dinamicheskaya zadacha otsenki povrezhdennosti materiala akusticheskimi metodami. *Akusticheskiy zhurnal*, **56**, **4**, 554–557.
14. Kashtanov A. V., Petrov Yu. V. (2006) Energeticheskiy podkhod k opredeleniyu mgnovnoy povrezhdennosti. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, **76**, вып. 5, 71–75.
15. Muravyev V. V., Zuyev L. B., Komarov K. L. (1996) *Скорость звука и структура стали и сплавов*. Москва, Наука.
16. Zaytsev V. Yu., Nazarov V. Ye., Talanov V. I. (2006) «Неклассические» проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики. *Успехи физических наук*, **1**, 97–102.
17. Birring A. S., Bartlett M. L., Kawano K. (1989) Ultrasonic Detection of Hydrogen Attack in Steels. *Corrosion (National Association of Corrosion Engineers)*, **45**, 3.
18. Hirsekorn S., Van Andel P. W., Netzelmann U. (1998) Ultrasonic Methods to Detect and Evaluate Damage in Steel. *NDT & E.*, **15:6**, 373–393;
19. Kot R. (2001) *Hydrogen Attack, Detection, Assessment and Evaluation. 10th APCNDT*. <http://www.ndt.net/apcndt2001/papers/1154/1154.htm>
20. Molika Nardo R., Cerniglia D., Lombardo P. et al. (2016) Detection, characterization and sizing of hydrogen induced cracking in pressure vessels using phased array ultrasonic data processing. *21st European Conference on Fracture, ECF21, 20–24 June 2016, Catania, Italy*. *Procedia Structured Integrity*, **2**, 581–588.
21. <http://www.williamsublishing.com/PDF/5-8459-0710-1/part.pdf>.
22. Isimaru A. (1981) Rasprostraneniye i rasseyaniye voln v sluchayno-neodnorodnykh sredakh. t. 1. Moskva, Mir.
23. Yermolov I. N., Alechin N. P., Potapov A. I. (1991) Кн. 2. Акустические методы контроля: практ. пособиye. Sukhorukov V. V. (red.) *Неразрушающий контроль*. В 5 кн. Москва, Vysshaya shkola.
24. Spivak L. V. (2008) Sinergicheskiye efekty deformatsionnogo otklika v termodinamicheskii otkrytykh sistemakh metall-vodorod. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, **178**, **9**, 897–922.
25. <http://energyfirefox.blogspot.com/2012/02/boxplot.html>

Р. И. РОМАНИШИН, Я. Л. ИВАНИЦКИЙ,
В. В. КОШЕВОЙ, С. Т. ШТАЮРА, И. М. РОМАНИШИН,
О. М. МОКРЫЙ, П. М. СЕМАК

Физико-механический институт НАН Украины, 79060,
г. Львов, ул. Научная, 5. E-mail: pminasu@lviv.ua

**УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД ОЦЕНКИ РАССЕЯННОЙ
ПОВРЕЖДЕННОСТИ МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ
ВОЗВРАТНО-РАССЕЯННОГО СИГНАЛА**

Предложен неразрушающий метод оценки рассеянной поврежденности в объеме материала на основе регистрации возвратно-рассеянного ультразвукового сигнала в виде А-скана. Изложены информационные технологии обработки возвратно-рассеянного сигнала и результаты экспериментальной апробации на образцах с разной степенью водородной поврежденности. Библиогр. 25, рис. 4.

Ключевые слова: рассеянная поврежденность, ультразвуковой возвратно-рассеянный сигнал, статистическая обработка, дисперсия, В-скан

R. I. ROMANISHIN, YA. L. IVANITSKII, V. V. KOSHOVYI,
S. T. SHAYURA, I. M. ROMANISHIN, O. M. MOKRYI,
P. M. SEMAK

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine.
5 Naukova str., Lviv, 79060, E-mail:pminasu@lviv.ua

ULTRASONIC METHOD OF EVALUATION OF DIFFUSED
MATERIAL DAMAGE BASED ON BACK-SCATTERED
SIGNAL

Non-destructive method volume based on recording of back-

scattered ultrasonic signal in from of A-scan was proposed for evaluation of diffused damage in metal. Informative technologies of processing of back-scattered signal and results of experimental testing on samples with different level of hydrogen damage were presented. Ref. 25, Figures 4

Keywords: diffused damage, ultrasonic back-scattered signals, statistical processing, dispersion, B-scan

Надійшла до редакції
23.03.2017

XVI МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ – 2017

МЕЖДУНАРОДНЫЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ

 МЕТАЛЛО-ОБРАБОТКА	 УКРСВАРКА	 УКРВТОР	 УКРПРОМ АВТОМАТИЗАЦИЯ	 БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА
 ГИДРАВЛИКА ПНЕВМАТИКА	 ПОДШИПНИКИ	 УКРЛИТЬЕ	 ОБРАЗЦЫ, СТАНДАРТЫ, ЭТАЛОНЫ, ПРИБОРЫ	 ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЕ СКЛАДСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ





ОРГАНИЗАТОР:
Международный выставочный центр

Генеральный информационный партнер: 	Технический партнер: 
--	---

21-24
НОЯБРЯ

	☎ +38 044 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58 e-mail: maria@iec-expo.com.ua www.iec-expo.com.ua, www.mvc.ukr www.tech-expo.com.ua	МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР Украина, Киев, Броварской пр-т, 15 М "Левобережная"
---	--	--