

УДК 620.179.1

## ОЦІНЮВАННЯ ПОШКОДЖЕНОСТІ МАТЕРІАЛІВ АКУСТИЧНИМИ МЕТОДАМИ (Огляд). Ч. 2

*В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, І. М. РОМАНИШИН, О. М. МОКРИЙ, П. М. СЕМАК*

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

Проаналізовано сучасні тенденції розвитку ультразвукових методів оцінювання пошкодженості: на основі “некласичного” прояву структурно обумовлених нелінійних ефектів, “структурних” шумів, вперед розсіяного сигналу: дифузного ультразвуку, хвильової інтерферометрії.

**Ключові слова:** *пошкодженість, нелінійна ультразвукова спектроскопія, зворотно розсіяний сигнал, В-скан, “дифузний” ультразвук, хвильова інтерферометрія.*

Modern tendencies of the development of ultrasonic methods for assessing damageability based on “non-classical” manifestation of structure-specified non-linear effects, “structural” noise, scattered forward signal of diffusion ultrasound of wave interferometry are analyzed.

**Keywords:** *damageability, non-linear ultrasonic spectroscopy, reverse scattered signal, B-scan, “diffusion” ultrasound, wave interferometry.*

**Вступ.** Для виявлення особливостей поширення акустичних хвиль у металах з різного типу мікрodefектами розвинуті експериментальні методи доплерівської лазерної інтерферометрії [1]. Результати ультразвукового (УЗ) дослідження водневої пошкодженості сталей подано у праці [2], а огляд способів виявлення і оцінювання наводнюваності сталей – в статті [3]. Подано [4] В-скани пошкодженого наводненням матеріалу після сканування об’єктів за допомогою УЗ решітки. Описано [5] УЗ технологію розрізнення пор і включень (оксидів, сульфідів) у металах за результатами сканування товстолистових об’єктів УЗ перетворювачем (частота 10 МГц), за реєстрації луно-сигналів, побудови С-скану, wavelet-аналізу (або аналізу за допомогою віконного Фур’є-перетворення) окремих реалізацій. Запропоновано [6] УЗ технологію виявлення тріщин з допомогою нелінійного ефекту (генерації субгармонік і вищих гармонік тріщиною) під час зондування металу трансмісійним методом на частоті 10 МГц з подальшим виділенням субгармоніки (5 МГц) і другої гармоніки (20 МГц) широкосмуговим п’єзоперетворювачем на частоті 15 МГц і розрахунком нелінійних параметрів (відношення гармонік). Експериментальна апробація підтвердила, що тріщина на порядок підвищує субгармоніку та другу гармоніку, а також відповідні нелінійні параметри. Описано [7] технологію, яка ґрунтується на обертанні хвильового фронту УЗ хвилі, згенерованої лазерним імпульсом під час сканування поверхні контрольованого виробу, і дає можливість фіксувати поверхневі і підповерхневі тріщини розміром до кількох міліметрів, дефекти у зварних з’єднаннях, стоншення стінок на згинах. Розроблена УЗ система статистичної діагностики технічного стану порцелянових ізоляторів [8]. Концепція узгодженої генерації і оброблення сигналів з досліджуваними параметрами структури подана у працях [9–12].

Створено сучасні УЗ томографи-дефектоскопи для контролю стану металу, зокрема, УД4-76 [13], томограф високочастотний УЗА1550 IntroVisor [14], програмований цифровий пристрій US-Key [15], які здатні працювати як у режимі

сучасних дефектоскопів, так і у режимі В-скан, який презентують як томографічний. Особливості цих пристроїв – використання багатоелементних антенних решіток як перетворювачів, ARD-діаграм для оцінювання еквівалентних розмірів дефектів та неоднорідностей, алгоритму SAFT для оброблення даних і візуалізації просторового розподілу дефектів у режимі В-скан.

Сьогодні велику увагу приділяють опрацюванню зареєстрованих сигналів та візуалізації у вигляді “різних сканів” [16–20]. Виявлено [21] спільні закономірності формування і специфічні особливості структури пошкоджених матеріалів, з одного боку, а також порошкових (ПМ) та композиційних (КМ) – з іншого, що обумовлені способом їх виготовлення і яким властиві об’ємні пори, неповністю сформовані контакти між частинками порошку та поверхні поділу між фазами, які формують мезоструктуру матеріалів і суттєво впливають на експлуатаційні характеристики. Це є основою для застосування подібних методів неруйнівного контролю.

**Акустична діагностика на основі “некласичного” прояву мікроструктурно обумовленої нелінійності.** За навантаження матеріалу під час УЗ зондування проявляються лінійні та нелінійні ефекти [22–25]. Нелінійні реєструють, вимірюючи субгармоніки, вищі гармоніки, або за модуляційними ефектами – формуванням різницевої частоти.

Є класичне та некласичне розуміння нелінійності. За класичним під час деформування матеріалу вона обумовлена нелінійними членами в законі Гука [22, 25]  $\sigma = E(\epsilon + \gamma^{(2)}\epsilon^2 + \gamma^{(3)}\epsilon^3 + \dots)$ , де  $\sigma$  – напруження;  $\epsilon$  – деформація;  $E$  – модуль пружності (щоб не обтяжувати розгляд, визначають поздовжні деформації). Характерні значення безрозмірних квадратичного та кубічного коефіцієнтів нелінійності  $\gamma^{(2)}$  та  $\gamma^{(3)}$  для однорідних аморфних матеріалів і монокристалів лежать у діапазоні кількох одиниць, а деформацій, як правило, малі (наприклад,  $\epsilon < 10^{-5}$  навіть для інтенсивних акустичних навантажень і  $\epsilon < 10^{-3}$  – для звичайних) [22]. Таким чином, нелінійні поправки порівняно з лінійним доданком дуже малі, хоча саме вони обумовлюють теплове розширення і залежність швидкості пружних хвиль від механічного напруження і температури. Оцінки коефіцієнтів нелінійності на основі таких ефектів досить добре узгоджуються з уявленнями про форму міжатомного потенціалу і його слабку ангармонічність. Водночас за тієї ж форми потенціалу для теоретичних оцінок напружень, що відповідають порогу руйнування, ще в 20-ті роки минулого століття виявили великі (на 2–4 порядки) розбіжності з результатами експериментів. Вивчаючи їх причини, вдалося зрозуміти роль мікроструктурних дефектів і сформувати самостійний науковий напрям – фізику дислокацій [22]. Навіть в акустичному діапазоні амплітуд (на кілька порядків нижче деформацій, що викликають руйнування) наявність мікрodefектів може чітко проявлятися в модифікації нелінійних властивостей середовища. Це лежить в основі акустичної діагностики, що ґрунтується на “некласичному” прояві мікроструктурно обумовленої нелінійності [21–25].

У 1970-х рр. отримали перші експериментальні результати про те, що під час накопичення втомних пошкоджень зміна мікроструктури металу може проявлятися в багаторазовому зростанні акустичної нелінійності [22, 23]. При цьому можлива якісна модифікація нелінійно дисипативних ефектів. Така інформація накопичена для багатьох середовищ: метали з втомними або термічними пошкодженнями структури, гірські породи, штучні матеріали (в т.ч. композити) з тріщиноподібними дефектами і розшаруваннями, або міжзеренними контактами, нанокристалічні метали, зернисті середовища. Високу “структурну чутливість” акустичної нелінійності часто фіксують вже на початковій стадії пошкодження матеріалу за ще майже незмінних лінійних пружних модулів. На цій стадії традиційними лінійними методами, заснованими на зміні швидкості пружних хвиль, ще не вдається виявити і оцінити пошкодженість.

Сильне зростання акустичної нелінійності мікронеоднорідних середовищ найчастіше спричиняють компоненти з різко контрастними лінійними пружними властивостями. Причому розмір  $m$  яких включень-дефектів малий проти довжини пружної хвилі, а також їх концентрація незначна. Характерним прикладом таких дефектів є тріщина, яка за різними відомими моделями може бути повністю закрита стискальним напруженням, що створює у навколишньому матеріалі середню деформацію, яка приблизно дорівнює відношенню розкриття тріщини  $d$  до її діаметра  $D_0$ . Це означає, що тріщина приблизно в  $D_0/d$  разів  $m$  якша, ніж навколишній матеріал-матриця. Типові значення  $d/D_0$  дуже малі і становлять  $10^{-3} \dots 10^{-5}$ .

Іншим прикладом контрастно  $m$  яких дефектів є міжзеренні контакти, які через малу площу дотикання у багато разів більше стискувані, ніж матеріал у межах зерен. Скупчення дислокацій межами зерен полікристалів значно податливіші до тангенціального навантаження, ніж навколишні ділянки з одноріднішого матеріалу.

Особливості діагностики оцінювали, використовуючи “некласичні” мікροструктурно обумовлені нелінійні ефекти [24].

Нелінійні системи ґрунтуються на залежності відгуку середовища від амплітуди (інтенсивності) зондувальної хвилі, що можна використати для виявлення внутрішніх пошкоджень у середовищі за відсутності апріорної інформації про вплив дефектів на зміну відгуку. Якщо часовий відгук перестає лінійно рости зі збільшенням амплітуди зондувальної хвилі, тобто у ньому з'являються нові особливості, або в спектрі виникають нові спектральні компоненти, то це може свідчити про пошкодження. Найпростіший спосіб діагностики, заснований на збудженні звуку ударом, давно використовували для обстеження колісних пар поїздів, а також перевірки кристалевих та фарфорових виробів за їх дзвоном під час постукування.

Найпростішою моделлю об'єкта зі структурною нелінійністю є контакт двох пластин, одна з яких гладка, а друга – шорстка [24]. З ростом притискального зусилля  $P$  збільшується кількість “зубців” (мікровиступів), які деформуються, внаслідок чого жорсткість контакту підвищується. В реологічних моделях мікροструктурно обумовлені нелінійності моделюють різномодульними залежностями.

За структурною нелінійністю можна діагностувати якість контактуючих шорстких поверхонь [24]. Коли притискальне зусилля двох контактуючих пластин, одна з яких шорстка, прямує до нуля ( $P \rightarrow 0$ ), хвиля, що падає на одну з пластин з частотою  $\omega$ , майже повністю відбивається від межі поділу. При  $P \rightarrow \infty$  вона пройде крізь межу, оскільки акустичний контакт буде ідеальним. В обох випадках (якщо  $P \rightarrow 0$  і  $P \rightarrow \infty$ ) відбитої хвилі на частоті  $2\omega$  не виникне. Друга гармоніка появляється за проміжних значень  $P$ , а залежність амплітуди зміщення  $U_{2\omega}$  від зусилля  $P$  має максимум. Цікаво, що крива  $U_{2\omega}(P)$  описує статистичний розподіл висот мікрориступів.

Зафіксували високу чутливість (на порядок більшу) нелінійних параметрів до пошкоженості (втоми) проти лінійних (швидкості та загасання) [25]. Характерна часова різномасштабність мікροструктурно обумовленої неоднорідності [25]. Реєструють некласичну мікροструктурно обумовлену нелінійність методом резонансної УЗ спектроскопії [21, 25], який полягає в збудженні зразка зондувальною хвилею певної амплітуди, реєстрації відгуку, виконанні перетворення Фур'є та знаходженні “резонансної” частоти (частотного складника з максимальною амплітудою). Важливою його особливістю є зменшення резонансних частот зі збільшенням амплітуди хвилі. За нахилом кривої амплітуда зондувальної хвилі-резонансна частота відгуку оцінюють пошкодження матеріалу.

Основним недоліком УЗ резонансної структуроскопії є суттєве зростання частотного відгуку із ускладненням геометрії зразка.

**Оцінка пошкодженості за структурними шумами.** Одним з найінформативніших тут є розсіяний УЗ сигнал, який раніше розглядали як “структурний” шум [26, 27].

Особливо велике розсіювання в матеріалах, які складаються з різномірних частинок (бетон, граніт, чавун), і в матеріалах з великою пружною анізотропією (мідь, аустенітна сталь). Для металів коефіцієнт загасання  $\alpha_s$  збільшується з ростом пружної анізотропії, середнього розміру кристалітів  $\bar{D}$  і частоти:  $\alpha_s \sim f^n$  ( $n = 2 \div 4$ ). В області  $\lambda / \bar{D} = 4 \dots 10$  він становить  $\sim \bar{D} f^2$ , а якщо  $\lambda > 10\bar{D}$ , то  $\sim \bar{D}^3 f^4$ . Для прикладу в маловуглецевій сталі його значення для поздовжніх і поперечних хвиль, якщо  $\lambda > 10\bar{D}$ , такі [28]:

$$\alpha_l = 0,12f + 20\bar{D}^3 f^4, \quad (1)$$

$$\alpha_t = 0,1f + 105\bar{D}^3 f^4. \quad (2)$$

Тут розмір  $\bar{D}$  подано в mm; частота  $f$  – в MHz;  $\alpha$  – у Np/m. Перший доданок, пропорційний частоті, характеризує поглинання, другий – розсіювання.

Вперше експериментально зареєстрували осцилограми зворотно розсіяного сигналу (ЗРС) у зразках з водневою пошкодженістю автори в праці [29], стверджуючи, що у всіх попередніх дослідженнях водневої пошкодженості УЗ методами обмежувались вимірюванням швидкості і загасання ультразвуку. За зворотним розсіюванням визначали розмір зерна. Виявили також, що амплітуда ЗРС на частоті 10 MHz у результаті водневої пошкодженості зростає в 7–12 разів.

Провідною організацією з розвитку технологій УЗ контролю на основі реєстрації ЗРС є Центр неруйнівного контролю університету Айови [30–34].

Найпоширеніші такі моделі розсіювання УЗ у твердому тілі: на основі ансамбля розсіювачів [35], згорткові [36–39], на основі імпедансної теорії [40], теорії перенесення [41], теорії ліній передачі [42], механіки суцільного середовища, розсіювання у випадково неоднорідних середовищах [43], самоузгоджена динамічна модель оцінювання пошкодженості акустичним методом, на основі вищих статистик ЗРС [44], “дифузного” УЗ [45], на основі CWI-технологій [46, 47].

Якщо довжина хвилі значно перевищує радіус сфери, переріз розсіювання пропорційний четвертому степеню частоти (*релеївське наближення, яке справедливе, якщо розсіювальний центр малий проти довжини хвилі*) [48]. Цю умову застосовують для окремого центра, а не до їх ансамбля, що не відповідає релеївському наближенню. Зі збільшенням концентрації розсіювальних центрів, а також тоді, коли довжина хвилі порядку розміру розсіювача, релеївське наближення незастосовне і розсіювальні центри не можна розглядати як незалежні.

Розроблені технології оцінювання пошкодженості за результатами реєстрації і оброблення вперед і зворотно розсіяного сигналу. Для зіставлення їх можливостей проаналізуємо залежність розсіяного поля від напряму зондування і спостереження за наближенням Борна [49]. Поширення гармонічних хвиль  $p(\vec{x}, t) = p(\vec{x})e^{j\omega t}$  описує рівняння Гельмгольца:

$$\nabla^2 p(\vec{x}) + k^2 p(\vec{x}) = S(\vec{x}), \quad (3)$$

де  $p$  – тиск;  $k$  – хвильове число;  $S(\vec{x})$  – джерело (функція об’єкта).

Його розв’язком у борнівському наближенні буде поле, розсіяне від джерела розсіювання, в об’ємі  $V_0$ :

$$p_{sc}(\vec{r}) \approx \frac{P_0 k^2 e^{jkr}}{4\pi r^2} \int_{V_0} S(\vec{x}_0) e^{-j\vec{k}\vec{x}_0} dx_0, \quad (4)$$

де  $r$  – відстань між розсіювальним об’ємом і точкою спостереження;  $P_0$  – амплі-

туда хвилі, що падає;  $\vec{K}$  – вектор розсіювання, що дорівнює різниці між хвильовими векторами падаючого і розсіяного поля.

Вираз (4) можна розглядати як просторове перетворення Фур'є функції об'єкта  $S(\vec{x})$ . Розсіяне поле в напрямку поширення відповідає низьким (біля нуля) значенням у  $K$ -просторі об'єкта і несе інформацію про низькочастотні його характеристики, значно більші за довжину хвилі. Зворотно розсіяне несе інформацію про вищі просторові частоти об'єкта розсіювання (порядку половини довжини хвилі), що відповідає меншим структурним елементам. Таким чином, зворотно розсіяний сигнал чутливіший до малих дефектів і включень, ніж розсіяний прямо.

Запропонована УЗ технологія оцінювання статистичних параметрів перерізу зворотного розсіювання (як випадкової величини) на основі реєстрації і статистичного оброблення “структурного шуму” (“grain noise”) [44]. В її основі – модель взаємозв'язку між параметрами ЗРС та статистичних розсіювачів. За модель розсіювального середовища приймали набір “точкових” розсіювачів. ЗРС подавали як стохастичний процес у вигляді

$$\{\tilde{Z}(x, t)\} = \sum_{n=1}^{N(x)} \tilde{A}_n(x) f(t - \tilde{\tau}_n(x)), \quad (5)$$

де  $\tilde{A}_n$  – переріз розсіювання  $n$ -го розсіювача;  $\tilde{\tau}_n$  – час затримки ЗРС для  $n$ -го розсіювача;  $N(x)$  – кількість розсіювачів у заданому елементарному об'ємі;  $f(t)$  – комплексна оригінальна зондувального УЗ радіоімпульсу.  $\tilde{A}_n, \tilde{\tau}_n$  – статистично незалежні величини.

Встановили [44], що за оцінками кумулянтів, обчисленими за виразом (5), можна визначити моменти розподілу перерізу зворотного розсіювання  $\tilde{A}_n$ :  $|\hat{c}_1| \mapsto \hat{m}_{1,A}$ ,  $|\hat{c}_2(0)| \mapsto \hat{m}_{2,A}$ ,  $|\hat{c}_3(0,0)| \mapsto \hat{m}_{3,A}$ . Розроблено низку технологій оцінювання пошкодженості на основі реєстрації і опрацювання “структурного” шуму (ЗРС) [50–52].

Для дослідження впливу розтягального одновісного навантаження на акустичні структурні шуми вибрали конструкційну низьколеговану сталь 09Г2С, з якої виготовили типові зразки за ГОСТ 1497-84 з трьох вирізаних фрагментів трубопроводу Ду1420-15,7. Фрагменти заздалегідь термічно обробляли, щоб отримати різні структурні стани [50]. Зразки мали корсетний виріз у середній частині для локалізації напружень і пошкоджень за розтягу. Для випробувань використовували машину Instron 300DX. Зразки навантажували поступово з кроком 10 kN до навантаження 100 kN, а далі – з кроком 5 kN.

Для зондування і реєстрації ЗРС застосовували УЗ прямиий роздільно суміщений п'єзоперетворювач з резонансною частотою 5 MHz. Як опорний сигнал – релеївську хвилю (“пролаз”)  $R$ , яка виникала під час перевипромінювання УЗ хвилі в приймальну призму і до якої нормували “структурний” шум. Інформативним ЗРС вважали відношення “структурного” шуму  $U_{SN}$  до “пролазу” релеївської хвилі  $U_R$  [50].

Згідно з отриманими результатами [50], для досліджуваних зразків рівень “структурного” шуму незначно змінювався до досягнення границі плинності. В момент дослідження він різко знижувався, що свідчило про початок пластичного течіння.

Останнім часом з'явилося чимало праць, присвячених контролю якості конструкційних матеріалів з допомогою “дифузного” УЗ [25, 45] та технологіям Coda Wave Interferometry (CWI) [46, 47]. Зазначимо, що технології “дифузного” УЗ опрацьовують сигнал, зареєстрований в одній точці, а CWI-оброблення передбачає його реєстрацію в кількох.

Інтенсивність “дифузного” УЗ описує рівняння дифузії [25, 45]:

$$D\nabla^2 \langle E(x, y, z, t) \rangle - \frac{\partial}{\partial t} \langle E(x, y, z, t) \rangle - \alpha \langle E(x, y, z, t) \rangle = -f(x, y, z, t), \quad (6)$$

де  $D$  і  $\alpha$  – коефіцієнти дифузії і загасання;  $\langle E(x, y, z, t) \rangle$  – усереднена за ансамблем густина енергії УЗ;  $f(x, y, z, t) = E_0 \delta(x) \delta(y) \delta(z) \delta(t)$  – зовнішнє джерело.

Розв'язок рівняння дифузії в необмеженому середовищі запишемо у вигляді

$$\langle E(x, y, z, t) \rangle = \frac{E_0}{8(D\pi t)^{3/2}} e^{-(d^2/4Dt) - \alpha t}. \quad (7)$$

Тут  $E_0$  – початкова густина УЗ енергії;  $d$  – відстань між джерелом і приймачем. Коефіцієнт дифузії можна теоретично розрахувати [25, 45] за залежністю

$$D = cl_e/3, \quad (8)$$

де  $c$  і  $l_e$  – швидкість хвилі і середній шлях вільного пробігу. Розміри, кількість та розподіл тріщин і частинок (розсіювачів) впливають на середній шлях вільного пробігу УЗ. Експериментальні дослідження засвідчили [25, 45], що дифузне наближення можна застосовувати, коли відстань між джерелом і приймачем вчетверо більша, ніж середній шлях вільного пробігу.

**CWI-оброблення розсіяної хвилі.** Ця технологія призначена для виявлення слабких локальних змін у складних неоднорідних середовищах [46, 47]. Низькочастотні сигнали (довжина хвилі значно більша за розмір розсіювачів) поширюються без розсіювання і поглинання. Високочастотні зазнають багатократного розсіювання, що призводить до багатопроменевого поширення хвилі, незначної зміни її форми (через слабкі неоднорідності) та помітної різниці ходу.

Відмінностей між зареєстрованими сигналами (розсіяною  $u_p$  і балістичною  $u_0$  хвилями) на початку нема. Оскільки,  $\lambda \ll l_e$  ( $l_e$  – довжина вільного пробігу), середнє збурення середовища проявляється як зміна часу поширення. Затримку розсіяного сигналу визначають за коефіцієнтом кореляції [46, 47], який обчислюють у часовому вікні з центром у момент часу  $t$  і шириною  $2T$ :

$$C(\varepsilon_i) = \frac{\int_{t-T}^{t+T} u_0[t'(1-\varepsilon_i)] u_p[t'] dt'}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} u_0^2[t(1-\varepsilon_i)] dt} \int_{t_1}^{t_2} u_p^2[t] dt}}. \quad (9)$$

Таким чином, властивості середовища встановлюють за часом надходження (поширення) сигналу, визначаючи параметр  $\varepsilon_i$ , за якого коефіцієнт кореляції максимальний.

## ВИСНОВКИ

Останнім часом для оцінювання пошкодженості застосовують нелінійні структурно чутливі акустичні методи, які (за літературними даними) на початковій стадії пошкодження матеріалу на порядок чутливіші, ніж традиційні лінійні, засновані на зміні швидкості пружних хвиль. Реєструють нелінійні структурно чутливі акустичні ефекти методом резонансної ультразвукової спектроскопії. Виявляти пошкодженість в об'ємі матеріалу найефективніше методом, який реєструє та опрацьовує розсіяні сигнали. Проаналізовано методи, які використовують вперед (“дифузний” ультразвук, хвильова інтерферометрія), а також зворотно розсіяний сигнали (“структурний” шум, який збільшується зі зростанням пошкодженості), В-скан та оцінюють пошкодженість у площині В-скана.

1. *Обнаружение микродефектов в металлах на основе изучения акустических полей / Ю. В. Житлухина, Д. В. Перов, А. Б. Ринкевич, В. С. Пермикин // Дефектоскопия. – 2007. – № 10. – С. 26–40.*

2. *Hirse Korn S., Van Andel P. W., and Netzelmann U.* Ultrasonic methods to detect and evaluate damage in steel // *Nondestructive Testing and Evaluation*. – 1998. – **15**, № 6. – P. 373–393.
3. *Kot R.* Hydrogen Attack, Detection, Assessment and Evaluation // 10<sup>th</sup> APCNDT. – 2001. DOI:<https://www.ndt.net/apcndt2001/papers/1154/1154.htm>
4. *Detection, characterization and sizing of hydrogen induced cracking in pressure vessels using phased array ultrasonic data processing / R. Molika Nardo, D. Cerniglia, P. Lombardo, S. Pecoraro, and A. Infantino // Proc. Struct. Integrity*. – 2016. – **2**. – P. 581–588.
5. *Ville E. K., Eskelinen J. J., and Hæggstrom E. J.* Discriminating pores from inclusions in rolled steel by ultrasonic echo analysis // *Meas. Sci. Techn.* – 2011. – **22**, № 10. – 7 p.
6. *Hyunjo J. and Barnard D.* Simultaneous measurements of harmonic waves at fatigue-cracked interfaces // *Chin. Phys. Lett.* – 2011. – **28**, № 8. – P. 084302.
7. *Application of ultrasonic wave propagation imaging method to automatic damage visualization of nuclear power plant pipeline / Jung-Ryul Lee, Hyomi Jeong, Chia Chen Ciang, Dong-Jin Yoon, and Seung-Suk Lee // Nuclear Eng. and Design*. – 2010. – **240**, № 10. – P. 3513–3520.
8. *Галаган Р. М.* Ультразвукова система статистичної діагностики технічного стану порцелянових ізоляторів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – К.: НТУ “КПІ”, 2011. – 20 с.
9. *Карташев В. Г., Севалкин Д. А.* Корреляционные характеристики структурного шума в ультразвуковой дефектоскопии // *Вестник Московск. энергетич. ин-та*. – 2007. – № 3. – С. 100–105.
10. *Проблемы и особенности пространственно-временной обработки сигналов при ультразвуковом контроле изделий из сложноструктурных материалов / В. К. Качанов, В. Г. Карташев, И. В. Соколов, Л. В. Воронкова, А. Б. Родин, Д. В. Тимофеев // Дефектоскопия*. – 2010. – № 4. – С. 3–18.
11. *Карташев В. Г., Качанов В. К., Шалимова Е. В.* Основные положения теории пространственно-временной обработки сигналов применительно к задачам ультразвуковой дефектоскопии изделий из сложноструктурных материалов // *Дефектоскопия*. – 2010. – № 4. – С. 19–29.
12. *Проблемы выделения ультразвуковых сигналов из структурного шума при контроле изделий из сложноструктурных материалов / В. К. Качанов, В. Г. Карташев, И. В. Соколов, М. В. Туркин // Дефектоскопия*. – 2007. – № 9. – С. 71–86.
13. <http://ndt.com.ua/ultrasonic.htm>.
14. <http://ndtpribor.ru/product/tomograf-a1550-introvisor/>.
15. [http://www.lecoeur-electronique.net/crbst\\_21.html](http://www.lecoeur-electronique.net/crbst_21.html).
16. <http://www.ge-mcs.com/en/ultrasound/software.html>.
17. <http://www.ge-mcs.com/en/ultrasound/software/ultraworks.html>.
18. <http://www.ge-mcs.com/en/ultrasound/integrated-systems/k-scan.html>.
19. <http://www.ge-mcs.com/en/ultrasound/integrated-systems/nuscan.html>.
20. <http://www.ge-mcs.com/en/ultrasound/portable-flaw-detectors/uslt-series.html>.
21. *Вдовиченко О. В.* Ідентифікація мезоструктури та визначення властивостей порошкових і композиційних матеріалів методами акустичної спектроскопії: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – К.: ПІМ ім. І. М. Францевича НАН України, 2020. – 38 с.
22. *Зайцев В. Ю., Назаров В. Е., Таланов В. И.* Неклассические проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики // *Успехи физ. наук*. – 2006. – **176**, № 1. – С. 97–102.
23. *Зайцев В. Ю., Прончатов-Рубцов Н. В., Гурбатов С. Н.* Нелинейные акустические явления в структурно-неоднородных средах. Эксперименты и модели. – Нижний Новгород: Ин-т прикл. физики Росс. академии наук, 2009. – 268 с.
24. *Руденко О. В.* Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // *Успехи физ. наук*. – 2006. – **176**, № 1. – С. 77–95.
25. *Cédric Rayan.* Contribution à la caractérisation non destructive des milieux complexes: Ultrasons diffus et non-linéarité // *Habilitation à Diriger des Recherches*. – Marseille: Aix Marseille Université, 2015. – 164 p.
26. *Ермолов И. Н.* Структура // *Дефектоскопия*. – 2000. – № 6. – С. 97–98.
27. *Ермолов И. Н.* Влияние акустического контакта на эхо-сигнал и структурные помехи // *Дефектоскопия*. – 1999. – № 5. – С. 96–97.
28. *Незрушаючий контроль і діагностика: Справ. / В. В. Ключев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов и др. / Под ред. В. В. Ключева*. – М.: Машиностроение, 1995. – 448 с.
29. *Birring A. S., Bartlett M. L., and Kawano K.* Ultrasonic detection of hydrogen attack in steels // *Corr. (National Association of Corrosion Engineers)*. – 1989. – **45**, № 3. – P. 259–263.
30. <https://www.cnde.iastate.edu/ultrasonics/ut-publications>

31. *Thompson R. and Margetan F. J.* Use of elastodynamic theories in the stochastic description of the effects of microstructure on ultrasonic flaw and noise signals // *Wave Motion*. – 2002. – **36**. – P. 347–365.
32. *Yu Linxiao, Thompson R. B., and Margetan F. J.* The spatial correlation of backscattered ultrasonic grain noise: theory and experimental validation // *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. – 2010. – **57**, № 2. – P. 363–378.
33. *Rudi C. and Mlade M.* Testing method for quick determination of fresh concrete sample quality by measurements at elastic properties of hydrating cement past. [http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Sevilla02\\_ult03018.pdf](http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Sevilla02_ult03018.pdf)
34. *Tao Wang T. and Saniie J.* Analysis of low-order autoregressive models for ultrasonic grain signal characterization // *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. – 1991. – **38**, № 2. – P. 116–124.
35. *Кеннеди Р.* Каналы связи с замираниями и рассеянием / Пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1973. – 304 с.
36. *Бархатов В. А.* Восстановление распределения отражателей по дальности. Обращение свертки // *Дефектоскопия*. – 2003. – № 6. – С. 10–17.
37. *Бархатов В. А.* Модели формирования ультразвуковых сигналов в задачах реконструкции изображений // *Дефектоскопия*. – 2005. – № 1. – С. 10–19.
38. *Бархатов В. А.* Решение одномерной обратной акустической задачи с учетом дисперсии скорости звука и частотно-зависимого затухания волн // *Дефектоскопия*. – 2009. – № 1. – С. 40–53.
39. *Бархатов В. А.* Экспериментальное исследование решений одномерной обратной акустической задачи // *Дефектоскопия*. – 2012. – № 12. – С. 55–64.
40. *Бобровицкий Ю. И.* Импедансная теория рассеяния звука: общие соотношения // *Акуст. журн.* – 2006. – **52**, № 5. – С. 601–606.
41. *Исмару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. – М.: Мир, 1981. – **1**. – 280 с.
42. *An inverse electromagnetic scattering method for one-dimensional inhomogeneous media / Lin Zhi-Wei, Xu Xin, Zhang Xiao-Juan, Fang Guang-You* // *Chin. Phys. Lett.* – 2011. – **28**, № 1. – P. 014101.
43. *Состояние теории распространения волн в случайно-неоднородной среде / Ю. Н. Барабаненков, Ю. А. Кравцов, С. М. Рыгов, В. И. Татарский* // *Успехи физ. наук.* – 1970. – **140**, № 9. – С. 3–42.
44. *Miralles R, Vergara L., and Gosalbez J.* Material grain noise analysis by using higher-order Statistics // *Signal Proc.* – 2004. – **84**, № 1. – P. 197–205.
45. *Effectiveness of diffuse ultrasound for evaluation of micro-cracking damage in concrete / E. Ahn, M. Shin, J. Popovics, and R. Weaver* // *Cement and Concrete Res.* – 2019. – **124**. – P. 105862. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105862.
46. *Principles and applications of ultrasonic-based nondestructive methods for self-healing in cementations materials. Review / E. Ahn, H. Kim, S. Sim, S. Shin, and M. Shin* // *Materials*. – 2017. – **10**, № 3. – 21 p. DOI: 10.3390/ma10030278.
47. *Planès T. and Larose E.* A review of ultrasonic Coda Wave Interferometry in concrete // *Cement and Concrete Res.* – 2013. – **53**. – P. 248–255. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.07.009.
48. *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чук Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. – М.: Мир, 1972. – 308 с.
49. *A contactless ultrasonic surface wave approach to characterize distributed cracking damage in concrete / S. Nam, H. Song, M. L. Oelze, and J. S. Popovics* // *Ultrasonics*. – 2017. – **75**, March. – P. 46–57. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2016.11.003>.
50. *Контроль структурного состояния сталей с помощью акустических шумов / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. И. Дедов, А. В. Байтеряков* // *Приборы и методы измерений*. – 2014. – № 2. – С. 60–64.
51. *Чабан Н. І., Рибіцький І. В., Миндюк В. Д.* Розвиток акустичного виду контролю для виявлення та оцінювання структурних змін сталевих конструкцій // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2018. – № 3. – С. 27–30.
52. *Ультразвуковий метод оцінювання розсіяної пошкодженості матеріалу на основі зворотного розсіяного сигналу / Р. І. Романишин, Я. Л. Іваницький, В. В. Кошовий, С. Т. Штаюра, І. М. Романишин, О. М. Мокрий, П. М. Семак* // *Техн. діагностика і неруйнівний контроль*. – 2017. – № 2. – С. 42–49.

Одержано 23.07.2021