

УДК 620.179.1

## ОЦІНЮВАННЯ ПОШКОДЖЕНОСТІ МАТЕРІАЛІВ АКУСТИЧНИМИ МЕТОДАМИ (Огляд). Ч. 1

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

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

Описано прямі і непрямі методи оцінювання пошкодженості, в тому числі за густиною матеріалу, розміром зерна, відносними змінами параметрів, із використанням підходів, заснованих на явищі акустичної емісії. Вказано на переваги та обмеження традиційних ультразвукових методів оцінювання за швидкістю і загасанням різних типів хвиль.

**Ключові слова:** *пошкодженість, розмір зерна, швидкість поширення ультразвукових хвиль.*

Direct and indirect methods of damage assessment are described, including by the material density, grain size, relative changes in parameters, using approaches based on the phenomenon of acoustic emission. The advantages and limitations of traditional ultrasonic methods for estimating damage by velocity and attenuation of different types of waves are shown.

**Keywords:** *damage, grain size, velocity of propagation of ultrasonic waves.*

**Вступ.** Для діагностики матеріалів актуально оцінити їх пошкодженість (ступінь деградації) [1]. В матеріалознавстві деградацію розглядають як процес зародження і накопичення пошкоджень, який відбувається на початку експлуатації і призводить до змін властивостей матеріалу, зародження макротріщин і остаточного руйнування. Мікроскопічні дослідження свідчать, що кінетику руйнування полікристалічних матеріалів можна розділити на три стадії [2, 3]: утворення розсіяних за об'ємом мікропор і мікротріщин (зі середнім розміром 0,1...3 μm); їх об'єднання до критичного розміру, що визначає розмір структурної гетерогенності (порядку 10...100 μm); різка локалізація пластичної деформації, зародження і ріст макродефекту, лавинне руйнування. Описано тристадійну кінетику змін властивостей металу (швидкості поширення ультразвуку, модуля Юнга, електроопору) під час втомних випробувань [4].

Відомо багато теоретичних та експериментальних праць, де досліджували деградацію (пошкодженість) в'язких і крихких матеріалів у різних умовах експлуатації (статичне, зростальне та циклічне навантаження, агресивне середовище) на різних стадіях, а також мікро-, мезо-, макрорівнях [2–20]. Механізми втомного руйнування твердих тіл традиційно вивчають у двох напрямках – на мікро- і макрорівні.

Основну частину довговічності матеріалу займає стадія мікродефектоутворення, коли мікродефекти поступово накопичуються й об'єднуються в макродефект. Процеси на мезорівні, які передують виникненню макродефектів, практично не вдається реально теоретично описати і отримати конструктивні рішення. Тому їх вивчення на цьому етапі актуальне і пов'язане з феноменологічним підходом. У праці [7] наведена порівняльна таблиця прямих і непрямих методів оцінювання пошкодженості матеріалів. До перших відносять фракто- і металографію.

До непрямих – вимірювання різних чутливих до пошкодженості фізико-механічних характеристик (густини, модулів пружності, амплітуди механічних напружень, параметрів акустичної емісії, мікротвердості, електроопору).

Одними з перших почали досліджувати зв'язок міцності з ймовірнісними поняттями А. П. Александров і С. М. Журков, використовуючи статистичну модель руйнування ідеально крихкого тіла найслабшою ланкою. У подальшому С. М. Журков розробив кінетичну теорію міцності [8, 9]. У праці [10] розвинуто теорію міцності і крихкого руйнування тіл, послаблених випадковими дефектами – тріщинами, гостроконечними жорсткими включеннями. На основі теорії розвитку ізольованих дефектів типу тріщин і методів теорії ймовірності викладені алгоритми розрахунку ймовірнісних характеристик міцності тіл з довільним розподілом параметрів невзаємодійних дефектів (розмір, орієнтація). Побудовані ймовірнісні критерії руйнування таких тіл в умовах складного напруженого стану, проаналізовано ізотропні та анізотропні матеріали, а також пластини, послаблені наскрізними і поверхневими дефектами. Виявлено вплив дефектів, масштабного чинника, напруженого стану на міцність і критерії руйнування. Розроблена ймовірнісно-детерміністична механіка в томи [11].

Розвивається статистична теорія накопичення пошкодженості. Фундаментальною у цьому напрямку є праця А. М. Колмогорова “Про логарифмічно нормальний закон розподілу розмірів частинок при подрібненні”, в якій, досліджуючи подрібнення частинок під дією багатьох незалежних чинників, стверджують, що цей процес в решті-решт призводить до логарифмічно нормального закону розподілу їх розмірів. Для цього необхідні дві умови: щоб різні частини тіла фрагментувалися незалежно одна від одної і розміри фрагментів були пропорційні часу процесу. Ймовірно, на початковій стадії руйнування таким умовам відповідає накопичення пошкоджень, що супроводжується появою одиночних мікротріщин, довжина яких суттєво менша, ніж розмір зерна. Відзначимо, що логарифмічно нормальний закон розподілу в деяких випадках можна використати для оцінювання розподілу розмірів зерен у твердому тілі.

Встановлено [12] зміну функцій розподілу мікротріщин за довжиною перед критичною ситуацією (появою локалізованої тріщини), що, очевидно, свідчить про перехід від одного ієрархічного рівня процесу до наступного внаслідок злиття дефектів.

**Параметр пошкодженості Работнова–Качанова.** Найчастіше пошкодженість матеріалу пов'язують з виникненням і ростом мікрodefektів (мікропор, мікротріщин), їх об'єднанням – аж до утворення макроdefektу [2, 3, 21–23]. Для кількісної оцінки пошкодженості Ю. М. Работнов запропонував параметр  $D$  (в оригіналі  $\omega$ ), який є площею тріщин (пор) на одиницю площі поперечного перерізу в даний момент часу [24]:

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

де  $S_0$  – площа поперечного перерізу непошкодженого матеріалу;  $S$  – “ефективна його площа”. Тобто параметр пошкодженості є суто геометричною характеристикою поточного стану, який змінюється залежно від властивостей матеріалу та історії навантаження. Для непошкодженого матеріалу  $D = 0$ . Зі збільшенням пошкодженості він зростає до 1, а в момент руйнування  $D = 1$ .

Для оцінювання пошкодженості Л. М. Качанов [24] запропонував параметр суцільності  $\psi$ , який характеризує мікрodefektність структури. За відсутності пошкодженості  $\psi = 1$ , а з її збільшенням спадає до нуля. Можна вважати, що  $D = 1 - \psi$ .

Існують різні трактування пошкодженості, пов'язані з визначенням параметра  $D$  (1), які часто використовують для її оцінювання [23, 25]. Одна з них – по-

слаблення опору розтягу матеріалу з ростом пошкоженості, що обумовлено зменшенням ефективної площі поперечного перерізу, яка перебуває під розтягальним навантаженням.

Вважають також, що скорочення пружного відгуку тіла пов'язано з ростом пошкоженості, зокрема, зі зменшенням ефективної площі, яка передає зовнішні зусилля від однієї частини тіла до іншої, а отже, призводить до підвищення середнього напруження в перерізі за зовнішнього нормального напруження  $\sigma_0$  згідно з виразом [24]

$$\sigma = \sigma_0 / (1 - D), \quad (0 < D < 1)$$

і скорочення відгуку тіла.

Запропоновані інші означення пошкоженості: на основі відносного об'єму пор [21], відношення суми площ новоутворених дефектів до об'єму, в якому вони утворилися [26].

**Еволюційне рівняння пошкоженості.** Для прогнозування ресурсу безаварійної роботи виробу за розсіяною пошкоженістю необхідне еволюційне рівняння виду [27]

$$\frac{dD}{dt} = f(P, D), \quad (2)$$

де  $P$  – рівень навантаження.

Як правило, вважають, що для непошкодженого матеріалу  $D_{t=0} = 0$ . Критерій руйнування визначають з умови  $D_{t=T} = 1$ .

Праву частину рівняння (2) визначають за експериментальними результатами. Відомі загальні підходи до його отримання. Один з них заснований на законі збереження маси [27]. Тут пошкоженість  $D_*$  розглядають як об'єм мікропошкоджень (мікропор, мікротріщин тощо) на одиницю об'єму. Подаючи локальну поточну густину через параметр пошкоженості  $D_*$ , одержуємо:

$$\delta\rho = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\rho_0(1 - D_*) - \rho_0}{\rho_0} = -D_*. \quad (3)$$

Вираз

$$\delta\rho = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad (4)$$

описує зміну густини матеріалу, яку в технічній діагностиці називають “дефектом густини” і використовують для діагностування пошкоженості матеріалу [28].

Оцінюють пошкоженість руйнівними і неруйнівними методами [29]. Серед руйнівних найпоширеніші металографічні, методи експериментальної механіки тощо [30].

**Оцінювання пошкоженості металу за об'ємною густиною пор.** Прямим методом оцінювання структурної пошкоженості є експериментальне визначення об'ємної густини металу [28].

З накопиченням дефектів природно зменшується густина металу, тому одним з найпростіших і фізично обґрунтованих способів дослідження пошкоженості є визначення густини. У цьому випадку під час застосування методу гідростатичного зважування необхідна точність до  $\pm 0,0001$  г на зразках-вирізках від 5 до 20 г [28].

Густина досліджуваного металу

$$\rho_t = \frac{P_1\rho_2 - P_2\rho_1}{P_1 - P_2},$$

де  $\rho_1, \rho_2$  – густина повітря і води (довідникові дані);  $P_1, P_2$  – вага зразка у повітрі і воді. Отримане значення необхідно зіставити з густиною металу у вихідному стані і в момент руйнування. Зокрема, густина сталі 12Х1МФ у вихідному стані становить  $7,835 \text{ g/cm}^3$ , а в момент руйнування –  $7,778 \text{ g/cm}^3$ , тобто дефект густини під час руйнування сталі становить 1...1,25%, через що слід забезпечити високу точність експерименту.

**Оцінювання пошкодженості за розміром зерна.** Розмір зерна – основний параметр, який впливає на властивості сталі [30]. З його зменшенням поліпшуються міцнісні властивості, збільшуються ударна в'язкість та пластичність, знижується температура переходу металу в крихкий стан (інтервал холодноламкості), тобто схильність до крихкого руйнування. Одночасно збільшується електроопір, для феромагнетиків зростає коерцитивна сила, зменшується магнетна проникність. “Контроль” зміни розміру зерна в структурі сталі відповідальних вузлів і деталей є актуальним завданням для їх безпечної експлуатації [31–33].

Основним методом визначення розміру зерна згідно з ГОСТ 5639-82 “Стали і сплави. Методи виявлення и определения величины зерна” [34] є металографічний. Він руйнівний, базується на отриманні мікрошліфів та обчисленні площі зерен за допомогою мікроскопа. Розмір зерна оцінюють номером (балом) за спеціальною шкалою. Недоліки методу – висока вартість, великі часові затрати, вимірювання розміру зерна тільки на поверхні зразка.

У цьому ж стандарті [34] рекомендують ультразвуковий (УЗ) метод визначення розміру зерна за загасанням хвиль у релеївській області розсіювання УЗ. Найвідчутніше розмір зерна впливає на коефіцієнт загасання УЗ хвиль  $\alpha$ , якщо  $5 < \lambda/d < 15$ . Тому частоту УЗ коливань вибирають згідно з умовою

$$5 \leq \lambda/d \leq 15,$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі;  $d$  – середній розмір зерна.

Розмір зерна знаходять за коефіцієнтом загасання відносним або луно-імпульсним методами. Використовуючи УЗ метод, заздалегідь встановлюють залежність загасання УЗ коливань від розміру зерна на дослідних зразках, які виготовляють з певних марок сталі або сплаву. Вони повинні мати ту ж товщину (або діаметр) і чистоту поверхні. Шорсткість  $R_a$  контактної поверхні не повинна перевищувати  $2,5 \text{ }\mu\text{m}$ . За частоти  $0,65...10 \text{ MHz}$  можна оцінити розмір зерна від 1 до 7 балу. Таким чином, УЗ методи передбачають виготовлення еталонних зразків з того ж матеріалу, тієї ж геометрії, що і досліджуваний.

Зроблено безеталонний метод вимірювання середнього розміру зерна в плоских об'єктах [35], який ґрунтується на зондуванні об'єкта кількома частотами та реєстрації кількох донних відбитих сигналів. Для вимірювання середнього розміру зерна використовують також “структурний” шум (зворотно розсіяний сигнал) [36].

**Оцінювання пошкодженості за відносними змінами параметрів.** Для цього, крім відносних змін густини, використовують відносні зміни інших параметрів, чутливих до накопичення пошкоджень. У праці [37] ввели узагальнений параметр, який характеризує відносну зміну деякої величини, чутливої до пошкодженості:

$$\Delta W = 1 - P_d/P_0, \quad (5)$$

де  $P_d, P_0$  – параметри матеріалу з пошкодженням та без.

Чутливими до накопичення пошкоджень є густина, модулі пружності, акустико-емісійні параметри [37]. При цьому говорять про “дефект густини”, “дефект модуля пружності” тощо, розуміючи під цим відносні зміни розглядуваного параметра через пошкодженість.

Параметр пошкодженості (1) можна визначити за зміною модуля пружності [23]. Згідно з гіпотезою еквівалентної деформації [23]

$$D_1 = 1 - (E_d/E_0).$$

Якщо використати модель еквівалентної пружної енергії [23], то справедливе співвідношення

$$D_2 = 1 - (E_d/E_0)^{1/2}, \quad (6)$$

де  $E_d$  і  $E_0$  – модулі пружності пошкодженого (поточне значення модуля пружності) і непошкодженого матеріалу. Ураховуючи, що швидкість УЗ хвилі пропорційна квадратному кореню з модуля пружності, співвідношення (6) зведемо до обчислення “дефекту” швидкості цієї хвилі.

**Акустико-емісійний підхід.** У працях [26, 38, 39] наведено результати оцінювання пошкодженості матеріалів та елементів конструкцій з допомогою акустичної емісії. В його основі – запропонована [26, 38] модель кількісної оцінки об’ємної пошкодженості кристалічних тіл, за якою розроблено методи визначення механічної та акустико-емісійної міри об’ємної пошкодженості твердих тіл на ділянці локалізованих пластичних деформацій. Описано методологію кількісної оцінки акустико-емісійної міри об’ємної пошкодженості матеріалу в пластичній зоні макротріщини, запропоновано аналітичну залежність для її визначення і встановлено критерій початку розвитку макроруйнування. Отримано критерії встановлення стадій накопичення об’ємної пошкодженості під час зародження та розвитку мікро- та макротріщин.

Запропоновано акустико-емісійний підхід визначення часу зміни стадій руйнування (об’єднання мікротріщин у макродефект) за зміною функції розподілу такої випадкової величини, як час між актами акустичної емісії [17, 18]. Суть його ось у чому. Експериментально підтверджено, що на ранніх стадіях деформування потік сигналів акустичної емісії від мікроджерел, випадково розподілених по об’єму матеріалу, має пуассонівський характер. З об’єднанням мікродефектів у тріщину цей розподіл порушується. Для пуассонівського потоку існує інваріант (відношення середнього значення квадрата випадкової величини до квадрата її середнього значення), тобто

$$I = M[\tau^2]/M^2[\tau] = 2, \quad (7)$$

де  $M[\cdot]$  – середнє значення. За випадкову величину беруть часовий інтервал між двома сусідніми подіями пуассонівського потоку (актами акустичної емісії), який несе інформацію про кінетику пошкодження структури матеріалу. Таким чином, співвідношення (7) є інваріантом пуассонівського потоку (ординарного, з відсутністю післядії). Якщо деформація призводить до об’єднання мікротріщин у макродефект з подальшим його розвитком, ймовірнісні характеристики актів акустичної емісії стають взаємозалежними, порушуються гіпотеза про пуассонівський потік і рівність (7).

**Оцінювання пошкодженості ультразвуковими методами.** Для визначення розсіяної пошкодженості на мезорівні (порядку довжини зондувальної хвилі) найперспективніші УЗ методи, які традиційно базуються на вимірюванні швидкості поширення і загасання УЗ хвиль.

Основним інформативним параметром тут є швидкість поширення різних типів УЗ хвиль [40]. За малих деформацій густину вважають постійною. В межах пружної деформації  $\sigma = E\varepsilon$  ( $|\varepsilon| \leq \varepsilon_0$  модуль Юнга  $E = \text{const}$ , параметр  $\varepsilon_0$  відповідає границі пружності) швидкість поздовжньої хвилі  $c = \sqrt{E/\rho} = \text{const}$ . За пластичної ( $\sigma = \sigma(\varepsilon)$  – залежність між напруженням і деформацією, для якої згідно з експе-

риментальними даними  $0 < d\sigma/d\varepsilon < E$  при  $|\varepsilon| > \varepsilon_0$ ) швидкість  $c = (1/\rho \, d\sigma/d\varepsilon)^{1/2}$  знижується.

Для застосування УЗ методів необхідна висока точність вимірювання інформаційних параметрів (швидкості і загасання). Відносні зміни швидкості під час діагностування структурних змін складають десятки частки відсотка, а за оцінювання напружень – соті [40].

Акустичним методам, заснованим на явищах загасання УЗ хвиль, властиві велика похибка (до 10%) та складність вимірювання. Використовуючи їх, вважають, що швидкості поширення і загасання хвиль залежать від пошкодженості. Як правило, в механіці деформівного твердого тіла задачі динаміки розглядають окремо від задач про накопичення пошкодженості. При цьому постулюють, що швидкість УЗ хвилі є функцією пошкодженості і визначають коефіцієнти пропорційності. В праці [25] розглянули самоузгоджену задачу оцінювання пошкодженості матеріалу під час деформації, застосовуючи рівняння пошкодженості і теорію пружності.

Фазову швидкість  $v_{ph}$  і загасання вважають степеневими функціями частоти  $\omega$  і лінійними функціями пошкодженості  $D$  [25]:

$$v_{ph}(\omega) = c_0(1 - h_1 D - h_2 D \omega^2), \quad \alpha(\omega) = (h_3 + h_4 D) \omega^4,$$

де  $c_0 = \sqrt{E/\rho}$  – швидкість поздовжньої хвилі в непошкодженому стрижні;  $h_{1-4}$  – коефіцієнти, які необхідно експериментально визначити.

Еволюцію пошкодженості описує кінетичне рівняння [25]

$$\frac{d\psi}{dt} = f(\sigma, \psi),$$

де  $\sigma$  – зовнішнє напруження.

Функцію  $f(\sigma, \psi)$  часто апроксимують лінійною або поліноміальною залежностями. Рівняння, яке описує поширення поздовжньої хвилі в стрижні з урахуванням пошкодженості [25]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \beta \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (8)$$

доповнюють рівнянням про розвиток пошкодженості [25]

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \alpha \psi = \beta_2 E \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (9)$$

де  $u(x, t)$  – переміщення частин серединної лінії стрижня;  $\alpha$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  – константи, які характеризують пошкодженість матеріалу і зв'язок циклічних процесів з накопиченням пошкоджень.

Самоузгоджена динамічна задача оцінювання пошкодженості матеріалу акустичним методом полягає в знаходженні розв'язку системи (8), (9). У результаті отримують залежності швидкості поширення і загасання УЗ хвилі від частоти і параметрів пошкодженості [25].

Пошкодженість викликає дисперсію фазової швидкості поздовжньої хвилі і частотно залежне загасання, що дає можливість оцінювати її акустичним методом. Експериментально встановлено, що такі частотні залежності притаманні багатьом конструкційним матеріалам. У низькочастотному діапазоні хвиля поширюється практично без загасання. Зі зростанням частоти загасання зростає і стає одного порядку з постійною поширення.

## ВИСНОВКИ

Отже, можна стверджувати, що акустичні методи оцінювання пошкодженості неухильно розвиваються. Традиційні ультразвукові базуються на вимірюван-

нях швидкості поширення та загасання ультразвукових хвиль. З ростом пошкодженості швидкість їх поширення знижується (на десятки частки відсотка), а загасання зростає. Для реєстрації моменту виникнення макротріщини ефективний метод акустичної емісії, який ґрунтується на експериментально підтвердженій гіпотезі, що до виникнення макротріщини потік часів між актами акустичної емісії є пуассонівським, а з її появою змінюється. Ефективним є показник акустико-емісійної міри об'ємної пошкодженості матеріалів.

1. *Achenbach J.* Quantitative nondestructive evaluation // *Int. J. of Solids and Struct.* – 2000. – **37**. – P. 13–27.
2. *Бетехтин В. И., Кадомцев А. Г.* Эволюция микроскопических трещин и пор в нагруженных твердых телах // *Физика твердого тела.* – 2005. – **47**, вып. 5. – С. 801–807.
3. *Козинкина А. И., Рыбакова Л. М., Березин А. В.* Оценка степени микроразрушений при деформации металлических материалов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2006. – **72**, № 4. – С. 39–42.
4. *Ультразвуковой контроль накопления усталостных повреждений и восстановление ресурса деталей / Л. Б. Зуев, В. Я. Целлермаер, В. Е. Громов, В. В. Муравьев // Журн. техн. физики.* – 1997. – **67**, № 9. – С. 123–125.
5. *Romanushyn I. M.* Application of statistical approaches to estimating the degree of material degradation // *Rus. J. of Nondestructive Testing.* – 2010. – **46**, № 8. – P. 573–579.
6. *Природа локализации пластической деформации твердых тел / В. Е. Панин, В. Е. Егорушкин, А. В. Панин, Д. Д. Моисеенко // Журн. техн. физики.* – 2007. – **77**, вып. 8. – С. 62–69.
7. *Бобырь Н. И., Бабенко А. Е., Халимов А. П.* Континуальная механика поврежденности и ее использование в задачах сложного малоциклового нагружения // *Техн. діагностика і неруйнівний контроль.* – 2008. – № 4. – С. 25–34.
8. *Гильров В. Л.* Кинетическая концепция прочности и самоорганизованная критичность в процессе разрушения материалов // *Физика твердого тела.* – 2005. – **47**, вып. 5. – С. 808–811.
9. *Стрелюхин А. И., Федоров В. А.* Путь к разгадке кинетической прочности твердых тел (Серафим Николаевич Журков, 1905–1997) // *Вестник Томск. гос. ун-та.* – 2013. – **18**, вып. 4. – С. 1631–1633.
10. *Витвицкий П. М., Попина С. Ю.* Прочность и критерии хрупкого разрушения стохастически дефектных тел. – К.: Наук. думка, 1980. – 188 с.
11. *Ваганов Р. Д.* Вероятностно-детерминистская механика усталости. – М.: Наука, 2003. – 256 с.
12. *Ботвина Л. Р.* Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. – М.: Наука, 2008. – 334 с.
13. *Малкин А. И., Куликов-Костюшко Ф. А., Шумихин Т. А.* Статистическая кинетика квазихрупкого разрушения // *Журн. техн. физики.* – 2008. – **78**, вып. 3. – С. 48–56.
14. *Лебедев А. А.* Новые характеристики деградации материала на стадии развития рассеянных повреждений // *Техн. діагностика і неруйнівний контроль.* – 2008. – № 4. – С. 35–44.
15. *Assessment of damage level in materials by the scatter of elastic characteristics and static strength / A. A. Lebedev, I. V. Makovetskii, N. R. Muzyka, N. L. Volchek, and V. P. Shvets // Strength of Mat.* – 2006. – **38**, № 2. – P. 109–116.
16. *Патент України № 52107А.* Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання. Метод LM-твердості / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек. – Опубл. 15.01.2003; Бюл. № 1.
17. *Косенков И. В.* Способ и устройство для оценки технического состояния конструкций при акустико-эмиссионном контроле // *Изв. вузов. Радиоэлектроника.* – 2007. – № 9. – С. 63–69.
18. *Буйло С. И.* Метод идентификации стадий деформации и разрушения по положению особых точек восстановленного потока актов акустической эмиссии // *Дефектоскопия.* – 2008. – № 8. – С. 3–14.
19. *Патент на корисну модель №44165.* Спосіб оцінки деградації матеріалу на основі томографічних зображень / В. В. Кошовий, І. М. Романишин, Р. І. Романишин, М. А. Шама, Р. В. Шарамбага. – Опубл. 25.09.2009; Бюл. № 18.
20. *Zhigang Liu, Chenli O. Ya., Sanuzhak Ya. I.* Математичне моделювання нагромадження пошкоджень в умовах повзучості та корозійного розтріскування конструкційних матеріалів // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2020. – **56**, № 6. – С. 38–44.

21. Черемской П. Г., Слезов В. В., Бетехтин В. И. Поры в твердом теле. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 376 с.
22. Пермикин В. С. О диагностике ползучести теплостойких сталей. II. О расчете остаточного ресурса металла, эксплуатирующегося в условиях ползучести, по результатам контроля эксплуатационной микроповрежденности // Дефектоскопия. – 2011. – № 3. – С. 66–73.
23. Вплив виду деформації й текстури та пошкоджуваність та механічні властивості магнієвого сплаву ZE10 / В. В. Усов, Н. М. Шкатулок, О. С. Савчук, Н. І. Рибак // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2020. – **56**, № 6. – С. 65–75.
24. Степанова Л. В., Игонин С. А. Описание рассеянного разрушения: параметр поврежденности Ю. Н. Работнова: историческая справка, фундаментальные результаты и современное состояние // Вестник Самарск. гос. ун-та. Естественнонаучная сер. – 2014. – № 3 (114). – С. 97–114.
25. Ерофеев В. И., Никитина Е. А. Самосогласованная динамическая задача оценки поврежденности материала акустическим методом // Акуст. журн. – 2010. – **56**, № 4. – С. 554–557.
26. Скальський В. Р., Андреїків О. Є. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії. – Львів: Видав. центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2006. – 330 с.
27. Каишанов А. В., Петров Ю. В. Энергетический подход к определению мгновенной поврежденности // Журн. техн. физики. – 2006. – **76**, вып. 5. – С. 71–75.
28. Технология диагностирования и оценка остаточного ресурса паропроводов высокого давления тепловых электростанций по уровню микроповрежденности металла / Е. Я. Векслер, И. В. Замекула, В. Ю. Толстов, Е. В. Семешко // Техн. діагностика і неруйнівний контроль. – 2010. – № 1. – С. 23–31.
29. Assessment of the in-service degradation of pipeline steel by destructive and nondestructive methods / Yu. V. Mil'man, H. M. Nykyforchyn, K. E. Hrinkevych, O. T. Tsyryl'nyk, I. V. Tkachenko, V. A. Voloshyn, and L. V. Mordel' // Materials Science. – 2012. – **47**, № 5. – P. 583–589.
30. Дымкин Г. Я., Кадикова М. Б. Ультразвуковой метод количественной оценки структуры металла осей колесных пар // Дефектоскопия. – 2009. – № 7. – С. 27–36.
31. Rozel A., Ricard Y., and Bercovici D. A thermodynamically self-consistent damage equation for grain size evolution during dynamic recrystallization // Geophys. J. Int. – 2011. – **184**. – P. 719–728.
32. Ricard Y. and Bercovici D. A continuum theory of grain size evolution and damage // J. of Geophys. Res. – 2009. – **114**. – P. B01204.
33. Xu H. H. K. and Jahanmir S. Effect of grain size on scratch damage and hardness of alumina // J. of Mat. Sci. Letters. – 1995. – **14**. – P. 736–739.
34. ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – М.: Изд. стандартов, 1983. – 22 с.
35. Курков А. В. О возможности экспресс-контроля среднего размера зерна металлопроката // Дефектоскопия. – 2008. – № 1. – С. 51–56.
36. Муравьев В. В., Байтеряков А. В., Дедов А. И. Определение размера зерна металла по акустическим структурным шумам // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2014. – **57**, № 11. – С. 65–69.
37. Недосека С. А., Недосека А. Я. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой // Техн. діагностика і неруйнівний контроль. – 2010. – № 1. – С. 9–16.
38. Скальський В. Р. Явище акустичної емісії в оцінюванні пошкодженості елементів конструкцій // Вісник НАН України. – 2016. – № 2. – С. 59–66.
39. Структурно-энергетические закономерности накопления повреждений при деформировании гетерогенного материала / Е. Е. Дамаскинская, И. А. Пантелеев, Д. В. Корост, К. А. Дамаскинский // Физика твердого тела. – 2021. – **63**, вып. 1. – С. 103–109.
40. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура стали и сплавов. – М.: Наука, 1996. – 184 с.

Одержано 14.04.2021