

УДК:620.179.17

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ У ДІАГНОСТИЦІ ЗАПОВІЛЬНЕНОГО РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ

О. Є. АНДРЕЙКІВ¹, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ², І. Я. ДОЛІНСЬКА²

¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Зроблено огляд результатів теоретичних досліджень методу акустичної емісії (АЕ) для встановлення граничної рівноваги матеріалів з тріщинами, їх заповільненого руйнування (зародження і поширення тріщин) та визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій тривалого експлуатування. Водночас розроблено розрахункові моделі для визначення методом АЕ дефектів типу тріщин, об'ємної пошкодженості матеріалів та критерії механізмів їх руйнування, а також акустико-емісійні методики для побудови кінетичних діаграм заповільненого росту тріщин повзучості.

Ключові слова: акустична емісія, кількісна діагностика стану матеріалів, заповільнене руйнування, розрахункова модель, ріст тріщини.

The results of theoretical investigation of the method of acoustic emission for establishing the limit equilibrium of materials with cracks, their delayed fracture (initiation and propagation of cracks) and, thus, determining the residual life of structural elements of long-term operation are analyzed. At the same time, computational models for determination of crack-like defects, volumetric damage of materials, criteria of their fracture mechanisms, and also acoustic-emission techniques for construction of kinetic diagrams of slow growth of creep cracks are developed.

Keywords: acoustic emission, quantitative diagnostics of materials state, delayed fracture, calculation model, crack growth.

Вступ. Внаслідок тривалого експлуатування матеріалів і елементів конструкцій за дії силових і фізико-хімічних чинників (корозивно-наводнювальні середовища, температура) відбувається їх заповільнене руйнування [1–3]. Під час цього в матеріалі зароджуються і поширюються дефекти типу тріщин. Воно є довготривалим, але досить небезпечним, бо його важко передбачити, особливо на ранніх стадіях, коли тріщина поширюється всередині об'єму, не виходячи на поверхню, особливо за насичення матеріалу воднем. У зв'язку з цим необхідно діагностувати стан матеріалів і елементів конструкцій сучасними ефективними методами та засобами для виявлення в них дефектів з оцінкою їх впливу на міцність і довговічність на цей момент.

На сьогодні найефективнішим, якщо не єдиним методом діагностування заповільненого руйнування, є метод акустичної емісії (АЕ). По-перше, це пов'язано з тим, що таке руйнування супроводжується випромінюванням пружних хвиль внаслідок мікро- чи макрострибків локального акту руйнування з параметрами, які відносно легко реєструвати. По-друге, є можливість дистанційного контролю всього об'єму матеріалу за ускладненого доступу до об'єкта внаслідок дії агресивних середовищ (водень, корозивне середовище, високі температури). Досліджувати руйнування матеріалів цим методом почали ще в першій половині 20 ст. До 80-х років ці роботи здебільшого стосувались визначення локації дефектів (джерел випромінювання) та якісної оцінки руйнування [4].

Контактна особа: О. Є. АНДРЕЙКІВ, e-mail: andreykiv@ipm.lviv.ua

Для кількісної діагностики руйнування і визначення довговічності об'єкта контролю необхідно встановити взаємозв'язок між параметрами дефектів і сигналів АЕ, які супроводжують підростання цих дефектів. Водночас більшість досліджень в цьому напрямку мали емпіричний характер [5, 6]. Теоретичних результатів було недостатньо, що пов'язано з труднощами математичного моделювання процесів і розв'язування відповідних нестационарних динамічних задач теорії тріщин. Здебільшого інтенсивно розвивали теоретичні засади методу АЕ для діагностування руйнування матеріалів з 80-х років і до сьогодні у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України (ФМІ). Вперше були розв'язані в переміщеннях нестационарні динамічні задачі, на основі яких встановлено аналітичні залежності між параметрами дефектів і сигналів АЕ, які їх супроводжують [7]. Застосування їх у подальшому дало можливість побудувати модель кількісної оцінки об'ємної пошкодженості матеріалів [8]. Вперше на основі законів термодинаміки, сформульованого загального енергетичного підходу та методів механіки руйнування розроблено математичні моделі, які пов'язують швидкість заповільненого руйнування матеріалів з параметрами сигналів АЕ за їх довготривалого експлуатування [9, 10]. Використання в моделі параметрів акустограм, знятих з об'єкта контролю, дало можливість визначати залишкову довговічність елементів конструкцій тривалого експлуатування.

Розглянемо основні теоретичні результати для діагностування руйнування матеріалів і визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій методом АЕ, отримані у ФМІ НАН України.

Встановлення аналітичних залежностей між параметрами новоутворених тріщин і сигналів АЕ. На основі розв'язку нестационарної динамічної задачі акустичного випромінювання наскрізною тріщиною встановлено взаємозв'язок між довжиною стрибка тріщини Δl та амплітудами A_m сигналів АЕ у вигляді співвідношення [7]

$$\Delta l = b A_m^{2/3}, \quad (1)$$

в якому множник $b = b(x, y)$ визначають експериментально або обчислюють аналітично з рівності

$$b(x, y) = \alpha_1 l \left(2^{-1/3} \left[\left(L_1(x, y, t_m) \right)^2 + \left(L_2(x, y, t_m) \right)^2 \right]^{1/2} \right). \quad (2)$$

Тут функції $L_1(x, y, t_m)$ та $L_2(x, y, t_m)$ є відомими [5]; t_m – час, що відповідає максимуму функції $(u^2 + v^2)^{1/2}$ за фіксованих x, y ; u, v – компоненти вектора переміщень; α_1 – множник пропорційності між амплітудами механічного коливання та відповідного йому електричного сигналу.

Якщо під час докритичного росту тріщини зареєстровано K стрибків, то, просумувавши їх, отримуємо [7]:

$$\Delta l_{\Pi} = \sum_{k=1}^K \Delta l_k = b \sum_{k=1}^K A_k^{2/3}, \quad (3)$$

де Δl_{Π} – сумарний приріст довжини тріщини після K -го стрибка, Δl_k та A_k – відповідно розмір k -го стрибка тріщини та значення амплітуди сигналу АЕ, що при цьому виникають; b – множник пропорційності (залежить від міцнісних властивостей матеріалу, довжини тріщини, розміщення перетворювача сигналу АЕ відносно тріщини, робочих характеристик засобів відбору й опрацювання інформації).

Застосовуючи методи інтегральних перетворень і граничної інтерполяції, розв'язали у переміщеннях нестационарну динамічну задачу [7, 11]. Максимальні значення модуля вектора переміщень для поздовжньої та поперечної хвиль у тривимірному тілі запропоновано апроксимувати формулою

$$u_{\max}|_{c_i} = \delta_i \frac{\sigma_0 \Phi_i^{(d)}(\theta) r_0^2}{\rho c_1^2 R}, \quad (4)$$

де $i = 1$ відповідає поздовжній хвилі, $i = 2$ – поперечній, $\delta_1 = 0,452$, $\delta_2 = 0,832$; σ_0 – розтягувальні напруження; r_0 – радіус дископодібної тріщини; c_1 – швидкість поздовжньої хвилі; $\Phi_i^{(d)}(\theta)$ – функції, які характеризують кутовий розподіл випромінювання поздовжньої і поперечної хвиль; R – мінімальна віддаль від контуру тріщини до точки спостереження; ρ – густина матеріалу.

Залежність (4) дозволяє вважати, що величина $u_{\max}|_{c_i}$ є пропорційною до площі ΔS новоутвореного дефекту. Вважаючи, що амплітуда A_m сигналу АЕ пропорційна до $u_{\max}|_{c_i}$, отримали, що амплітуда сигналу АЕ пропорційна до новоутвореної площі внутрішньої плоскої тріщини [7, 11]:

$$\Delta S = \beta A_m, \quad (5)$$

де β – акустико-емісійна константа матеріалу, яку визначають із експерименту. Залежність (5) підтверджена експериментально у працях [6, 8, 12].

На підставі аналізу полів переміщень встановили, що під час докритичного росту тріщини через утворення K мікротріщин перед її вершиною сумарну площу S підростання останньої можна визначити так:

$$S = \beta \sum_{i=1}^K A_i. \quad (6)$$

У припущенні, що кількість мікрodefektів, які виникають біля фронту макротріщини, є пропорційною до об'єму зони передруйнування, знайдено [13], що сумарний рахунок АЕ N пов'язаний з коефіцієнтом інтенсивності напружень (КІН) формулою

$$N = b_0 K_1^4 L, \quad (7)$$

де b_0 – множник пропорційності; L – контур тріщини. За докритичного росту наскрізної тріщини ($L=h$, h – товщина зразка)

$$N = b_1 K_1^4, \quad (8)$$

де $b_1 = b_0 h$.

Оцінюючи за співвідношенням (7) величину K_1 і порівнюючи її із відомим для даного матеріалу значенням K_{IC} , можна встановити, наскільки розміри дефекту є близькими до критичних.

Створено модель кількісної оцінки об'ємної пошкодженості кристалічних тіл, яка ґрунтується на законі лінійного сумування пошкоджень [8, 14]. Основні положення моделі: механічну міру ξ об'ємної пошкодженості матеріалу визначають як відношення суми площ новоутворених дефектів S_i до об'єму, де вони утворилися V : $\xi = \sum S_i / V = S / V$; механічна міра ξ об'ємної пошкодженості лінійно пропорційна справжній деформації e полікристалічних тіл; введено поняття акустико-емісійної міри об'ємної пошкодженості матеріалу ξ_1 , яку визнача-

ють як відношення суми амплітуд сигналів АЕ до об'єму, де відбувається деформування

$$\xi_1 = \sum_{i=1}^K A_i / V ; \quad (9)$$

акустико-емісійна міра об'ємної пошкодженості матеріалу ξ_1 лінійно залежить від справжньої деформації полікристалічних тіл; механічна міра об'ємної пошкодженості ξ матеріалу пропорційна акустико-емісійній мірі об'ємної пошкодженості ξ_1

$$\xi = \beta_1 \xi_1 , \quad (10)$$

де β_1 – коефіцієнт пропорційності, який визначають експериментально.

На основі моделі розроблено експериментальні методики визначення механічної та акустико-емісійної міри об'ємної пошкодженості сталей та алюмінієвих сплавів в околі локалізованих пластичних деформацій, встановлено критичні значення цих величин і знайдено модельні константи, які пов'язують їх між собою для низки конструкційних матеріалів. Створено методологічні засади для кількісної оцінки АЕ міри об'ємної пошкодженості матеріалу у пластичній зоні макротріщини, запропоновано аналітичну залежність для її визначення та встановлено критерій початку розвитку макроруйнування. Розроблено моделі накопичення об'ємної пошкодженості матеріалів під дією воднево-механічного чинника, методики її кількісної оцінки. Одержано критерії визначення стадій накопичення об'ємної пошкодженості під час зародження та розвитку мікро- і макротріщин у композитних матеріалах. Створено методики прикладного застосування та засоби для досліджень з використанням методу АЕ.

Побудовано [15, 16] новий енергетичний критерій ідентифікування типів макроруйнування матеріалів за енергетичним параметром неперервного вейвлет-перетворення сигналів АЕ

$$E_{WT} = \int_{t_1}^{t_2} |WT(t)|^2 dt , \quad (11)$$

де $WT(t) = A_0 + B_0 \cdot e^{-0,5(\frac{t-C_0}{D_0})^2}$, A_0, B_0, C_0, D_0 – коефіцієнти апроксимації; E_{WT} – енергетичний параметр локального у спектрі імпульсу сигналу АЕ.

Залежно від інтервалу його числових значень можна визначати такі типи руйнування: $E_{WT} < \alpha_*$ – в'язке (пластична деформація); $\alpha_* \leq E_{WT} < \beta_*$ – в'язкокрихке (мікротріщиноутворення); $E_{WT} \geq \beta_*$ – крихке (ріст макротріщини), де α_* , β_* – числові значення. На основі енергетичного критерію (11) створено [15, 16] прикладні методики ідентифікування типів та джерел руйнування металів та їх зварних з'єднань, визначення моменту старту тріщин низькотемпературної повзучості, ідентифікування різних стадій руйнування волоконних композитів та інших матеріалів [17].

Математичні моделі визначення кінетики поширення тріщин через параметри АЕ. Вченими ФМІ НАН України вперше на основі законів термодинаміки розроблено загальний енергетичний підхід, який покладено в основу побудови математичних моделей (диференціальні рівняння в параметрах сигналів АЕ з початковими і кінцевими умовами) кількісного діагностування заповільненого руйнування матеріалів і визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за дії силових і фізико-хімічних чинників [1, 9, 10]. Суть підходу така. На основі

першого закону термодинаміки, зокрема, балансу енергетичних складових і роботи зовнішніх сил для елементарного акту руйнування (одиночного стрибка тріщини) і балансу швидкостей зміни цих складових, побудовано математичні моделі росту тріщин у силових параметрах заповільненого руйнування матеріалів, а далі на основі співвідношення (6) їх записано в параметрах АЕ. Нижче наведено деякі з них.

АЕ-діагностування тріщин повзучості. Нехай тривимірне тіло послаблено плоскою тріщиною початкової площі S_0 , обмеженої випуклим контуром L . Вважаємо, що тіло розтягується однорідним навантаженням інтенсивності p , яке створює симетричний відносно площини розміщення тріщини напружено-деформований стан. За умов навантаження в зоні передруйнування біля контуру тріщини відбувається локальна повзучість, яка спричиняє ріст тріщини. Задача полягає у визначенні періоду докритичного росту тріщини повзучості через параметри АЕ.

За формулою (6) площу S новоутворених дефектів (площу підростання тріщини) можна пов'язати з амплітудою сигналу АЕ. Для коректності математичного моделювання задачі усереднювали площі s_a мікроруйнувань та амплітуди A_a сигналів АЕ, що їх супроводжують. Тоді поточну площу тріщини можна записати у вигляді

$$S(t) = s_a n(t) = \beta \sum_{i=1}^n A_i \approx \beta A_a n(t), \quad (12)$$

де $n(t)$ – поточний імпульс, що перевищив поріг дискримінації (далі імпульс).

Оскільки кількість n імпульсів АЕ залежить від розміру площі дефекту, а не від її конфігурації, то замінювали таку тріщину круговою. Тоді кількість імпульсів, зареєстрованих під час поширення реальної тріщини, буде приблизно такою ж, як і під час поширення модельної кругової тріщини тієї ж площі S за відповідного навантаження.

Застосовуючи енергетичний підхід, побудували математичну модель у силових параметрах руйнування для визначення кінетики зміни площі кругової тріщини повзучості [9]

$$dS / dt = 2\pi a A_{2t} K_{CC}^{-2m} \left[K_I^{2m} - K_{thc}^{2m} \right] (1 - K_I^2 K_{CC}^{-2})^{-1}, \quad (13)$$

$$t = 0, S(0) = S_0; \quad t = t_*, S(t_*) = S_*; \quad K_I(S_*) = K_{CC}, \quad (14)$$

де a – радіус тріщини; A_{2t} , m – характеристики повзучості матеріалу; K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень; K_{thc} , K_{CC} – нижнє і верхнє порогові значення K_I на кінетичній діаграмі росту тріщини повзучості; S_* – критичний розмір тріщини.

Рівняння (13) з урахуванням рівності $K_I = 4p^2 \pi^{-1,5} \sqrt{S}$ запишемо у вигляді

$$dS / dt = 2A_{2t} \sqrt{\pi S S_{thc}^m S_*^{-m}} \cdot \left[\sqrt{S^m S_{thc}^{-m}} - 1 \right] \cdot [1 - \sqrt{S^m S_*^{-m}}]^{-1}, \quad (15)$$

де S_{thc} – розмір тріщини, за якого за заданого зовнішнього навантаження p тріщина повзучості не поширюватиметься.

З урахуванням (12), рівняння (15) записали через амплітуди АЕ. В результаті отримали кінетичне рівняння швидкості рахунку імпульсів АЕ, в яке входять їх амплітуди і характеристики повзучості матеріалу

$$dn / dt = 2\sqrt{\pi \beta^{-1} A_a^{-1} n A_{2t} \sqrt{n_{thc}^m n_*^{-m}}} \cdot \left[\sqrt{n^m n_{thc}^{-m}} - 1 \right] \cdot [1 - \sqrt{n^m n_*^{-m}}]^{-1}, \quad (16)$$

$$t = 0, n(0) = 0; \quad t = t_*, n(t_*) = n_*, \quad (17)$$

де $n_* = 0,0625A_a^{-1}\beta^{-1}\pi^3 p^{-4} K_{CC}^4 - S_0$ – критичне значення імпульсів АЕ; n_{thc} – кількість імпульсів АЕ, за якої утворюється тріщина площею S_{thc} , яка не поширюється за заданого зовнішнього навантаження p .

Інтегруючи диференціальне рівняння (16) за заданих початкової і кінцевої умов (17), для визначення періоду $t = t_*$ докритичного росту тріщини отримали формулу

$$t_* = \int_0^{n_*} \frac{0,5\sqrt{\beta A_a n [1 - \sqrt{n^m n_*^{-m}}]}}{\sqrt{\pi A_{2t}} \sqrt{n_{thc}^m n_*^{-m}} \left[\sqrt{n^m n_{thc}^{-m}} - 1 \right]} dn. \quad (18)$$

Таким чином, маючи параметри акустограм, записаних безпосередньо з об'єкта контролю, на яке діють довготривалі статичні навантаження, і характеристики повзучості матеріалу, залежність (18) дає можливість визначити його залишковий ресурс.

Кінетичні рівняння росту воднево-механічних тріщин. Розв'язано задачу про визначення періоду докритичного росту плоскої кругової воднево-механічної тріщини в тривимірному тілі, на яке діє воденьвмісне середовище і розтягується зовнішніми статичними зусиллями p , через параметри АЕ [10]. При цьому на основі енергетичного підходу побудовано розрахункову модель визначення періоду докритичного росту воднево-механічної тріщини через параметри КІН

$$\frac{dS}{dt} = \frac{a\alpha\eta_1 [K_I^2 - K_{Isc}^2] (C_0^{(1)})^2}{K_I^4 [K_{IC}^2 - K_I^2]^2}; \quad (19)$$

$$t = 0, S(0) = S_0; \quad t = t_*, S(t_*) = S_*, \quad (20)$$

де $\eta_1 = 0,9 \cdot 10^3 A_2^2 D \exp(2m_H) \pi^{-1} \sigma_T^3 E^3$; D – коефіцієнт дифузії водню; $C_0^{(1)}$ – концентрація водню на поверхні вершини тріщини; α – експериментально встановлена константа; $m_H = V_H (\sigma_m - \sigma_0) / (2RT_0)$; R – універсальна газова стала; V_H – парціальний молярний об'єм водню в металі; T_0 – абсолютна температура; $\sigma_m = 2,4\sigma_T$; $\sigma_0 = \sigma_T / \sqrt{3}$; σ_T – границя плинності матеріалу; σ_t – усереднені напруження в зоні передруйнування; E – модуль пружності; a – радіус кругової тріщини; K_{IC}, K_{Isc} – відповідно верхнє і нижнє порогові значення КІН K_I на кінетичній діаграмі поширення воднево-механічної тріщини. Подаючи КІН через площу тріщини, математична модель (19), (20) на основі рівності (12) набуде вигляду

$$\frac{dn}{dt} = \frac{(C_0^{(1)})^2 \eta_2 (\sqrt{n} - \sqrt{n_{sc}})}{A_a^2 \beta^2 p^6 \sqrt{n} (\sqrt{n_*} - \sqrt{n})^2}; \quad (21)$$

$$t = 0, n(0) = 0; \quad t = t_*, n(t_*) = n_*, \quad (22)$$

де $\eta_2 = 0,0625\alpha\eta_1\pi^4$; n_{sc} – кількість імпульсів, за якої утворюється тріщина площею S_{sc} , що не поширюється за заданого навантаження.

Інтегруючи рівняння (21) за умов (22), отримали формулу для визначення періоду докритичного росту воднево-механічної тріщини через параметри АЕ, які зареєстровано безпосередньо з об'єкта контролю:

$$t_* = \int_0^{n_*} \frac{A_a^2 \beta^2 p^6 \sqrt{n} (\sqrt{n_*} - \sqrt{n})^2 dn}{(C_0^{(1)})^2 \eta_2 (\sqrt{n} - \sqrt{n_{sc}})}. \quad (23)$$

Ріст корозійно-механічних тріщин. Здебільшого за дії корозійно-механічних чинників неможливий візуальний контроль за появою і розвитком тріщин через їх тунелювання всередині матеріалу без виходу на бокову поверхню та ускладнений доступ до об'єкта контролю. Виникла необхідність у розробленні методик діагностування такого руйнування і оцінювання періоду докритичного росту тріщин методом АЕ. Застосовуючи енергетичний підхід і основні концепції методу АЕ, побудували математичну модель, на основі якої отримали формулу для оцінювання періоду докритичного росту корозійно-механічної тріщини з коловим контуром її поширення [18]:

$$t_* = \int_0^{n_*} \frac{\phi^2(n_*) \sqrt{\beta A_a} [1 - \phi^2(n) \phi^{-2}(n_*)]^4}{\eta_5 \sqrt{2\pi n} \phi^2(n) [1 - \phi^{-2}(n) \phi^2(n_{sc})]} dn. \quad (24)$$

Тут $\eta_5 = 4 \cdot 10^{-3} \cdot i_{\max} (\alpha DB)^4$ – характеристика матеріалу, яку визначають із експерименту;

$$\phi(n) = \sqrt[4]{n(1 + 0,64\pi^{-1}h^{-2}\beta A_a n)(1,04 + 0,46\pi^{-1}h^{-2}\beta A_a n - 0,44\pi^{-2}h^{-4}\beta^2 A_a^2 n^2)}.$$

За відомих акустограм співвідношення (24) можна застосовувати до кількісної діагностики газонафтопроводів.

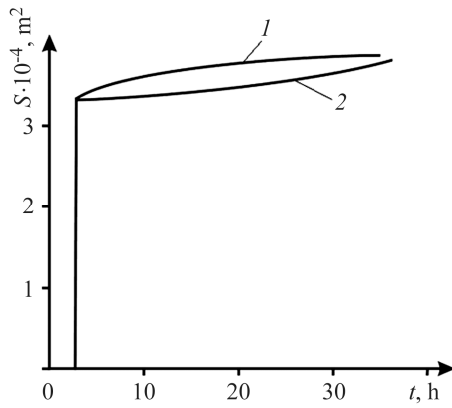


Рис. 1. Залежності росту площі S водневої тріщини від часу t : 1 – за рівнянням у силових параметрах [19]; 2 – за рівнянням (25) у параметрах АЕ.

Fig. 1. Dependences of the growth of area S of a hydrogen crack on time t :

1 – by the equation in force parameters [19]; 2 – by equation (25) in the parameters of AE.

АЕ-діагностування поширення водневих тріщин. Нагромаджений досвід експлуатації реакторів гідрокрекінгу нафти з наплавкою показав їх недостатній опір відшаруванню на межі сплавлення, що зумовило дослідження цих процесів. Відшарування відбувається внаслідок утворення та поширення суто водневих тріщин без додаткового силового навантаження. Оскільки тіло наводнене до надвисокої концентрації водню C_H , то цей водень з тіла дифундує в тріщину і створює в ній високі тиски $p(C_H)$, викликаючи цим поширення водневих тріщин. На основі рівняння кінетики зміни росту водневої тріщини, записане через силові параметри руйнування і водневої деградації [19], отримано нове диференціальне рівняння для визначення кінетики зміни площі $S(t)$ водневої тріщини через параметри АЕ (амплітуду, кількість імпульсів АЕ) і надвисокої концентрації водню [10]:

$$S(t) = \pi a_0^2 + \pi \left[\frac{1,125 \sqrt{n\beta A_a} R^2 T_0^2 D}{\pi^3 \sqrt{\pi} \delta_C^2 \sigma_t^2 (1 - \nu^2)^2} \int_{t_0}^{t_*} \frac{C_H^2(t) dt}{[1 - A_3 C_H(t)]^2} \right]^2. \quad (25)$$

Тут a_0 – початковий розмір тріщин; t_* – час, за який метал досягне локальної нестійкості; ν – коефіцієнт Пуассона; C_H – концентрація водню; D – коефіцієнт дифузії водню; T_0 – температура тіла; R – газова стала; A_3 – константа, яку визначають із експерименту.

Співвідношення (25) застосували [10] для дослідження відшарування на межі сплавлення основного металу і наплавки в корпусі реактора гідрокрекінгу нафти. На основі експериментальних досліджень відшарування наплавки з аустенітної сталі від основного металу зі сталі 15Х2МФА-А методом АЕ отримано параметри АЕ, які входять у рівняння (25) [20]. Взявши за основу ці параметри, а також характеристики для сталі 15Х2МФА-А, побудували (рис. 1) динаміку зростання площі водневої тріщини, де крива 2 отримана на основі рівняння (25) в параметрах АЕ, а 1 – за рівнянням у силових параметрах [19]. Різниця між кривими 1 та 2 незначна (~10%), що підтверджує коректність рівняння (25). Методику застосували для оптимізації складу матеріалів (наплавлення і корпусу) з погляду їх характеристик дифузії і розчинності для зменшення концентрації водню і, відтак, уникнення їх відшарування.

Акустико-емісійна методика для побудови кінетичних діаграм росту тріщин. Вищенаведені теоретичні засади методу АЕ для прогнозування залишкового ресурсу елементів конструкцій застосовано під час розроблення АЕ-методики для пришвидшеної побудови кінетичних діаграм поширення тріщин повзучості за довготривалого статичного навантаження [21]. Структура методики така. З допомогою АЕ будують діаграму – інтенсивність імпульсів АЕ від коефіцієнта інтенсивності напружень ($\dot{n} - K_I$) (рис. 2а). Далі будують аналітичний декодер переведення цієї діаграми у діаграму в параметрах: швидкість росту тріщини від коефіцієнта інтенсивності напружень ($V - K_I$). Суть його така.

Величини V і \dot{n} між собою пов'язані так:

$$V = f_2 z^{-1} \dot{n}, \quad (26)$$

де $f_2 \approx z k^{-1} \sum_{i=1}^k (\dot{n}_i)^{-1} \Delta_i l (\Delta_i t)^{-1}$. Тут Δl_i – видиме підростання тріщини повзучості

за відносно невеликі проміжки часу Δt_i за високих значень $K_{In}^{(i)} < K_{IC}$; \dot{n}_i – інтенсивність імпульсів АЕ; z – геометричний параметр; $k \geq 3$.

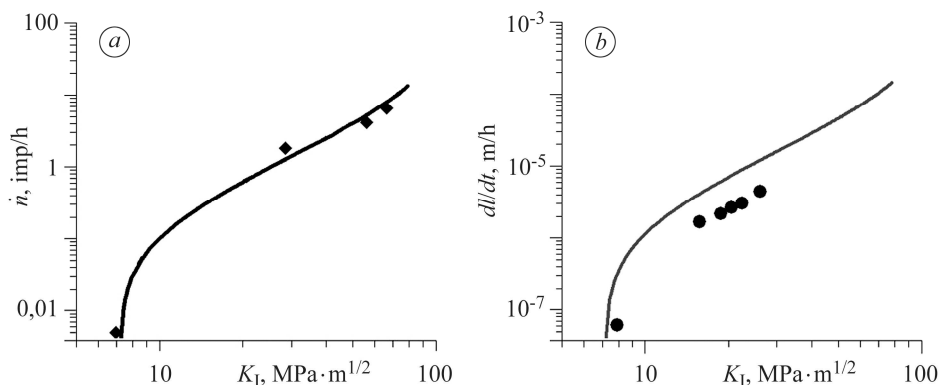


Рис. 2. Кінетична діаграма росту тріщини високотемпературної повзучості в координатах $\dot{n} - K_I$ (а) та $V - K_I$ (б): квадрати – експеримент; суцільна лінія – теорія; кружечки – експериментальні результати [22].

Fig. 2. Kinetic diagram of the growth of high-temperature creep crack in the coordinates $\dot{n} - K_I$ (а) and $V - K_I$ (б): squares – experiment; solid line – theory; circles – experimental data [22].

За такою методикою побудовано кінетичну діаграму росту тріщини повзучості для сталі 12Х1МФ (крива на рис. 2б). Поряд з цим наведено експериментальні результати (кружечки) для такої діаграми, отримані М. А. Махутовим [22].

Перевага цього методу в тому, що метод М. А. Махутова реалізовували упродовж трьох років, а запропонований – у межах місяця. Порівнюючи наведені результати, бачимо, що неточність отриманих у роботі результатів може піти тільки в запас довговічності, а не в ризик непередбачуваного руйнування.

ВИСНОВКИ

Наведено основні теоретичні результати методу акустичної емісії для кількісного діагностування руйнування матеріалів, отримані у ФМІ НАН України. Зокрема, на основі розв'язку нестационарної динамічної задачі встановлено лінійну залежність площі дефекту від амплітуди сигналу акустичної емісії. Ввівши поняття акустико-емісійної міри об'ємної пошкодженості матеріалу, побудували модель кількісної оцінки об'ємної пошкодженості елементів конструкцій. Розроблено математичні моделі для кількісного діагностування заповільненого руйнування матеріалів. Застосування моделей з урахуванням параметрів акустограм, знятих безпосередньо з об'єкта контролю, дає можливість визначити його залишковий ресурс.

1. *Андрейків О. Є., Скальський В. Р., Долінська І. Я.* Заповільнене руйнування матеріалів за локальної повзучості. – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2017. – 400 с.
2. *Андрейків О. Є., Бабій А. В., Долінська І. Я.* Вплив експлуатаційних середовищ і маневрового режиму навантаження на ресурс штанг польових обприскувачів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2020. – **56**, № 2. – С. 26–32.
(*Andreikiv O. E., Babii A. V., Dolinska I. Y.* Influence of the working media and maneuvering loading mode on the service life of spraying booms of field sprinklers // *Materials Science*. – 2020. – **56**, № 2. – P. 166–173.)
3. *Jiang Qionqin, Гембара О. В., Ченіль О. Я.* Моделювання впливу водню на нагромадження пошкоджень у сталях за високотемпературної повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2019. – **55**, № 2. – С. 104–111.
(*Jiang Q., Hembara O. V., and Chepil' O. Ya.* Modeling of the influence of hydrogen on the accumulation of defects in steels under high-temperature creep // *Materials Science*. – 2019. – **55**, № 2. – P. 251–259.)
4. *Nazarchuk Z., Skalskyi V., and Serhiyenko O.* Acoustic Emission. Methodology and Application. – Cham: Springer Int. Publ. AG, 2017. – 294 p.
5. *Болотин Ю. И., Маслов Л. А., Полушин В. И.* Установление корреляций между размером трещины и амплитудой импульсов акустической эмиссии // Дефектоскопия. – 1975. – № 4. – С. 119–122.
6. *Gerberich W. W., Atteridge D. G., and Lessar J. F.* An acoustic emission investigation of microscopic ductile fracture // *Metallurgical Transactions A*. – 1975. – **6A**, № 2. – P. 797–801.
7. *Андрейків О. Є., Лысак Н. В.* Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. – К.: Наук. думка, 1989. – 176 с.
8. *Андрейків О. Є., Скальський В. Р., Сергієнко О. М.* Визначення об'ємної пошкодженості алюмінієвих сплавів за сигналами акустичної емісії // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – **37**, № 3. – С. 77–90.
(*Andreikiv O. E., Skal's'kyi V. R., Serhiyenko O. M.* Determination of the bulk damage of aluminum alloys by signals of acoustic emission // *Materials Science*. – 2001. – **37**, № 3. – P. 456–472.)
9. *Визначення періоду докритичного росту тріщин повзучості за параметрами акустичної емісії / О. Є. Андрейків, В. Р. Скальський, І. Я. Долінська, Ю. Я. Матвіїв // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – 50, № 2. – С. 41–49.*
(*Determination of the period of subcritical growth of creep cracks according to the parameters of acoustic emission / O. E. Andreikiv, V. R. Skal's'kyi, I. Ya. Dolins'ka, Yu. Ya. Matviiv // Materials Science*. – 2014. – **50**, № 2. – P. 201–211.)
10. *Skalskyi V., Andreikiv O., Dolinska I.* Assessment of subcritical crack growth in hydrogen-containing environment by the parameters of acoustic emission signals // *Int. J. of Hydrogen Energy*. – 2018. – **43**. – P. 5217–5224.

11. *Analysis of acoustic emission caused by internal crack* / O. Ye. Andreykiv, M. V. Lysak, O. M. Serhienko, and V. R. Skalskyi // *Eng. Fract. Mech.* – 2011. – **68**, № 7. – P. 1317–1333.
12. *Acoustic emission crack monitoring in fracture toughness for AISI 4340 and SA 533B steels* / H. Takahashi, M. A. Khan, M. Kikuchi, and M. Suzuki // *Experimental Mechanics.* – 1981. – **21**, № 3. – P. 89–99.
13. *Андрейків А. Е., Лысак Н. В., Сергиенко О. Н.* Моделирование процессов локального разрушения, сопровождающегося акустической эмиссией, в материалах и изделиях (сообщ. 1) // *Техн. диагностика и неразр. контроль.* – 1990. – № 3. – С. 9–21.
14. *Скальський В. Р., Андрейків О. Є.* Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2006. – 330 с.
15. *Stankevych O., Skalsky V.* Investigation and identification of fracture types of structural materials by means of acoustic emission analysis // *Eng. Fract. Mech.* – 2016. – **164**. – P. 24–34.
16. *Скальський В. Р., Станкевич О. М.* Застосування сигналів акустичної емісії для ідентифікування типів макроруйнування твердих тіл. – Львів: Простір-М, 2020. – 264 с.
17. *Ідентифікування механізмів руйнування цементного каменю, армованого базальтовою та поліпропіленовою фібрами* / В. Р. Скальський, О. М. Станкевич, Б. П. Клим, А. Є. Лісничук, П. П. Великий // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2020. – **56**, № 4. – С. 7–18.
(*Identification of the mechanisms of fracture of cement mortar reinforced with basalt and polypropylene fibers* / V. R. Skalskyi, O. M. Stankevych, B. P. Klym, A. E. Lisnichuk, and P. P. Velykyi // *Materials Science.* – 2021. – **56**, № 4. – P. 441–453.)
18. *Розрахункова модель поширення корозійно-механічної тріщини за високих температур* / О. Є. Андрейків, І. Я. Долінська, А. Р. Лисик, Н. Б. Сас // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2016. – **52**, № 5. – С. 34–40.
(*Computational model of the propagation of stress-corrosion cracks at high temperatures* / O. E. Andreikiv, I. Ya. Dolins'ka, A. R. Lysyk, N. B. Sas // *Materials Science.* – 2017. – **52**, № 5. – P. 714–721.)
19. *Panasyuk V. V., Andreykiv O. Y., and Gembara O. V.* Hydrogen degradation of materials under long-term operation of technological equipment // *Int. J. of Hydrogen Energy.* – 2000. – **25**, № 1. – P. 67–74.
20. *Скальський В. Р., Андрейків О. Є., Сергиенко О. М.* Оцінка водневої пошкодженості матеріалів за амплітудами сигналів акустичної емісії // *Техн. диагностика и неразр. контроль.* – 1999. – № 1. – С. 17–27.
21. *Acoustic emission method in the delayed fracture mechanics of structural materials* / Z. Nazarchuk, O. Andreykiv, V. Skalskyi, and D. Rudavskyi // *Procedia Structural Integrity.* – 2019. – **16**. – P. 169–175.
22. *Махутов Н. А., Гринь Е. А., Саркисян В. А.* Кинетика развития трещин в энергомашиностроительных сталях при высокотемпературной ползучести // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2015. – **81**, № 11. – С. 44–52.

Одержано 23.09.2020