УДК: 539.375;539.4

АКУСТИКО-ЕМІСІЙНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДІЇ СИЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ І КОРОЗИВНИХ СЕРЕДОВИЩ

О. Є. АНДРЕЙКІВ¹, І. Я. ДОЛІНСЬКА², Н. С. ЗВЯГІН¹

¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка; ² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Побудовано акустико-емісійну модель локального руйнування (поширення тріщини) матеріалу. На підставі цього розроблено метод визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій за дії довготривалого статичного навантаження і корозивного середовища. Розмір тріщини і напруження в її площині запропоновано визначати за допомогою параметрів акустограми, знятої з елемента конструкції під час поширення тріщини. Для демонстрації застосування цього методу виконано числовий експеримент і встановлено залишковий ресурс пластини.

Ключові слова: акустична емісія, корозійно-механічна тріщина, залишковий ресурс, еталонна акустико-кінетична діаграма поширення корозійно-механічної тріщини, схема еталонної аналітичної акустограми за поширення тріщини.

An acoustic-emission model of local fracture (crack propagation) of the material is constructed. Based on this, a method of determining the residual lifetime of thin-walled structural elements under the action of long-term static load and corrosive environment has been developed. It is proposed to determine the size of the crack and the stress in its plane by using the parameters of the acoustogram taken from the structural element during the crack propagation. To demonstrate the application of this method, a numerical experiment is conducted and the residual lifetime of the plate is determined.

Keywords: acoustic emission, corrosion-mechanical crack, residual resource, reference acoustic-kinetic diagram of corrosion-mechanical crack propagation, scheme of reference analytical acoustogram during crack propagation.

Вступ. Одним з найнебезпечніших чинників, що знижує міцність і довговічність металевих елементів конструкцій, є одночасний вплив корозивного середовища та механічного навантаження на фізико-хімічні властивості і міцність матеріалів [1, 2]. Така ситуація виникає під час експлуатування більшості обладнання відповідального призначення в різних галузях промисловості. Особливо це актуально для найнебезпечніших для міцності конструкцій дефектів типу тріщин в умовах дії корозійно-механічних чинників [3, 4]. Проте здебільшого візуальний контроль за появою і розвитком тріщин неможливий через їх тунелювання всередині матеріалу та ускладнення доступу до об'єкта контролю. Тоді ефективним є метод акустичної емісії (AE) [5–11], який вигідно відрізняється від інших методів неруйнівного контролю високою чутливістю та можливістю дистанційного контролю всього об'єму матеріалу [12, 13].

Для успішного застосування методу AE необхідно мати залежності між параметрами дефектів типу тріщин і сигналами, які супроводжують їх ріст. В літературі такі залежності відомі як емпіричні [14–17], так і аналітичні [18, 19]. Сьогодні широко розповсюджені натурні дослідження із запису акустограм на об'єкті контролю, їх розшифровування і порівняння із еталонними акустограмами, отри-

Контактна особа: І. Я. ДОЛІНСЬКА, e-mail: ira_dolinska@ukr.net

маними в лабораторних умовах. Результати таких досліджень дають якісну оцінку як руйнування матеріалу, так і безпечного подальшого його експлуатування. Однак завдання полягає в тому, як з допомогою відомих параметрів акустограм оцінити кількісно залишковий ресурс об'єкта контролю. Таких досліджень у літературі не знайшли. Тут треба створювати відповідні теорії, які б математично описували руйнування об'єктів в умовах їх експлуатування і пов'язували параметри дефектів із акустограмами, знятими безпосередньо з об'єкта контролю. Раніше [20], будуючи теоретичні основи АЕ (еталонна акустико-кінетична діаграма поширення корозійно-механічної тріщини), для діагностування заповільненого руйнування матеріалів і елементів конструкцій приймали лінійну залежність між площею дефекту і сумою імпульсів АЕ під час його утворення. Ця гіпотеза також підтверджена результатами експериментальних досліджень росту корозійних тріщин [9, 21, 22], де спостерігали майже пропорційну залежність між її площею і сумою імпульсів АЕ.



Кінетична діаграма росту корозійно-механічної тріщини в координатах *dn/dt*–*K*_I.

Нижче зроблена спроба з допомогою АЕ побудувати теорію і здійснити числовий експеримент прогнозування залишкового ресурсу елементів конструкцій за дії довготривалого статичного навантаження та корозивного середовища. Для побудови такої теорії кінетична діаграма поширення корозійно-механічної тріщини за статичного навантаження покладена в основу еталонної акустико-кінетичної діаграми поширення корозійно-механічної тріщини, як залежності швидкості імпульсів АЕ від коефіцієнта інтенсивності напружень. При цьому приймаємо гіпотезу існування лінійної залежності між акустичною діаграмою поширення тріщини і механічною кінетичною діаграмою росту тріщин за статичного навантаження. Ця гіпотеза в багатьох підтверджена результатами працях експериментальних досліджень [9, 21].

За методикою, описаною раніше [20], з допомогою АЕ побудовано еталонну акустико-кінетичну діаграму поширення корозійно-механічної тріщини в сталі 45ХН2МФА як залежність інтенсивності dn/dt імпульсів АЕ від коефіцієнта інтенсивності напружень K_I (див. рисунок). Ця діаграма еталонна для акустограми, знятої безпосередньо з об'єкта контролю з даного матеріалу, і дасть можливість встановити рівень його навантаження і розмір тріщини.

Формулювання задачі та моделі. Нехай досліджуваний тонкостінний об'єкт знаходиться під дією корозивно-активного середовища і довготривалого статичного навантаження. В результаті їх сумісної дії в об'єкті може зародитися і надалі розвиватися прямолінійна корозійно-механічна тріщина. Виникає питання про безпечність подальшого експлуатування такого об'єкта, зокрема його залишковий ресурс. Для вирішення цієї задачі необхідно мати відповідну теорію (розрахункову модель), яка б описувала руйнування об'єкта (поширення тріщини з можливістю оцінки її докритичного росту), а для її застосування – інформацію про локацію і геометрію тріщини, а також рівень навантаження об'єкта. Як наведено вище, ефективним є метод АЕ. Таким чином, для подальших досліджень

Kinetic diagram of the corrosion crack growth in the $dn/dt-K_{\rm I}$ coordinates.

ставимо на об'єкт контролю первинні перетворювачі і, застосовуючи математичний метод тріангуляції, визначаємо локацію AE джерела – дефекту типу тріщини. Вважаємо, що тріщина рухається прямолінійно за механізмом нормального відриву. Надалі записуємо акустограму з можливістю отримати швидкість імпульсів AE від часу. Перш ніж йти на об'єкт необхідно в лабораторних умовах для зразка з такого ж матеріалу побудувати еталонну акустико-кінетичну діаграму поширення корозійно-механічної тріщини, тобто залежність швидкості імпульсів AE від коефіцієнта інтенсивності напружень. Далі знімаємо акустограму з об'єкта контролю, розшифровуємо її та порівнюємо дані із результаті такого порівняння встановимо коефіцієнт інтенсивності напружень. Для того, щоб оцінити залишковий ресурс такого тонкостінного об'єкта, побудуємо розрахункову модель для опису його корозійно-механічного руйнування, тобто схему еталонної аналітичної акустограми за поширення тріщини, яка пов'язуватиме силові та фізикохімічні параметри руйнування з параметрами AE. Суть моделі така.

Як тонкостінний об'єкт розглянемо пластину товщини h, піддану довготривалому статичному розтягу і впливу корозивного середовища. Пластина послаблена наскрізною плоскою прямолінійною тріщиною початкової площі S_0 , в яку потрапляє корозивне середовище, що сприяє її корозійно-механічному поширенню. Вважаємо, що тріщина поширюється за механізмом нормального відриву. Приймаємо, що за дії навантажень розтягу пластини напружено-деформований стан є симетричним стосовно площини розміщення тріщини і характеризуватиметься коефіцієнтом інтенсивності напружень K_1 . Необхідно оцінити залишковий ресурс пластини t_* – час, за який тріщина підросте до свого граничного значення.

Задачу розв'язуємо так. Використовуючи енергетичний підхід [23], запишемо рівняння визначення швидкості поширення корозійно-механічної тріщини:

$$V = \frac{dS}{dt} = -\left\lfloor \frac{d\Gamma}{dt} \right\rfloor_{t=\Delta t_c} / (\gamma_C - \gamma_t) , \qquad (1)$$

де Γ – енергія руйнування пластини, яка залежить від площі тріщини, часу і корозивного середовища; $t = \Delta t_c$ – час стрибка тріщини; $\gamma_t = \sigma_t \delta_t$ – усереднене значення роботи пластичних деформацій у зоні передруйнування; $\gamma_C = \sigma_t \delta_{CC}$ – її критичне значення; σ_t – усереднені нормальні напруження у зоні передруйнування; δ_t – розкриття у вершині тріщини; $\delta_{CC} = \delta_C - A_1 C_H (\Delta t)$ – його критичне значення за корозійного руйнування; δ_C – критичне значення δ_t без корозії; A_1 – константа, яку визначають із експерименту.

Для визначення періоду докритичного росту тріщини до рівняння (1) додамо початкову і кінцеву умови:

$$t = 0, \quad S(0) = S_0, \quad t = t_*, \quad S(t_*) = S_*, \quad \gamma_t(S_*) = \gamma_C,$$
 (2)

де S₀, S_{*} – початкова і гранична площі тріщини, відповідно.

Невідому енергію руйнування Г у рівнянні (1) визначатимемо так:

$$\Gamma = \Delta S \sigma_t \delta_{CC} \,.$$

Тут ΔS – площа елементарного стрибка тріщини, яку подамо [24], як суму елементарного поширення тріщини S_a внаслідок анодного розчинення і механічного стрибка S_m через механічне навантаження і наводнювання за електрохімічної корозії, тобто

$$\Delta S_C = S_a + S_m,\tag{4}$$

$$S_m = \alpha h(\delta_t - \xi), \ S_a = Fm^{-1}n^{-1} \int_{0}^{\Delta t} i(t)dt ,$$
 (5)

7

(3)

де F – число Фарадея; m – грам-еквівалентна вага металу; n – валентність металу; α , ξ – константи, які визначають із експерименту [24]; i(t) – густина анодного струму на поверхні вершини тріщини.

Розглядаємо випадок, коли швидкість анодного розчинення набагато менша від швидкості механічного росту тріщини. Тоді, на основі результатів [24] і співвідношень (4), (5), енергію руйнування $\Gamma(t)$ можемо подати наближено так:

$$\Gamma = \sigma_t \alpha h(\delta_t - \xi) [\delta_C - A_I C_H(t)].$$
(6)

Згідно з результатами [24], зміну концентрації водню $C_{\rm H}(\Delta t)$ з часом у зоні передруйнування для відносно великих часів можна подати у вигляді

$$C_{\rm H}(\Delta t) \approx B \Delta t_C i_{\rm max} , \qquad (7)$$

де В – константа системи метал-середовище, яку визначають із експерименту.

Оскільки площа стрибка тріщини ΔS достатньо мала, то, очевидно, на такій малій віддалі від вершини тріщини розкриття $\delta_t(x)$ змінюється незначно і його по *х* можна вважати константою, тобто $\delta_t(x) \approx \delta_t(0)$. Таким чином, на основі (6), (7), коли $\xi = \delta_{scc}$, рівняння (1) набуде вигляду

$$\frac{dS}{dt} = \alpha_1 h \frac{\delta_t - \delta_{scc}}{\delta_{CC} - \delta_t} \tag{8}$$

з початковою і кінцевою умовами

$$t = 0, \quad S(0) = S_0, \quad t = t_*, \quad S(t_*) = S_*, \quad \delta_t(S_*) = \delta_C.$$
 (9)

Тут δ_{scc} – нижнє порогове значення розкриття δ_t , за якого тріщина не поширюється; α_1 – константа, яку визначають із експерименту.

Якщо тріщина макроскопічна, тобто виконуються співвідношення $\delta_t = K_{\rm I}^2(\sigma_t E)^{-1}$, $\delta_{scc} = K_{scc}^2(\sigma_t E)^{-1}$, $\delta_{CC} = K_{\rm IC}^2(\sigma_t E)^{-1}$, розрахункова модель (8), (9) набуде вигляду

$$\frac{dS}{dt} = \alpha_1 h \cdot \frac{K_1^2(S) - K_{scc}^2}{K_{1C}^2 - K_1^2(S)},$$
(10)

$$t = 0, \quad S(0) = S_0, \quad t = t_*, \quad S(t_*) = S_*, \quad K_{\rm I}(S_*) = K_{\rm IC}.$$
 (11)

Тут *K_{scc}*, *K_{IC}* – нижнє і верхнє порогові значення на кінетичній діаграмі корозійно-механічного руйнування.

Для оцінки залишкового ресурсу елемента конструкції за моделлю (10), (11), як уже згадувалось вище, необхідно знати розмір прямолінійної плоскої тріщини і напружено-деформований стан біля неї, який характеризуватиметься коефіцієнтом інтенсивності напружень. Ці величини спробуємо знайти за допомогою методу AE і параметрів, отриманих із записаної на об'єкті акустограми. За відомою формулою [6, 18] площу новоутвореного дефекту можна пов'язати зі середньою амплітудою A_i імпульсу AE так:

$$S = \beta \sum_{i=1}^{n} A_i , \qquad (12)$$

де β – акустико-емісійна константа матеріалу, яку визначають із експерименту [6]; n – кількість імпульсів AE, зареєстрованих під час поширення тріщини. Аналогічно до праці [19], вважаємо, що стрибки підростання тріщини вздовж її контуру наближено однакові. Тому можна прийняти, що площі s_i мікроруйнувань, які генерують імпульси AE, будуть в середньому теж однакові. Будемо приймати їх як мікрокруги. Таке припущення для реальних матеріалів, в яких локальні параметри структури, площі мікроруйнувань і, відповідно, амплітуди імпульсів AE суттєво відрізняються, здавалося б є некоректне. Проте в матеріалознавстві ви-

правдане введення поняття розміру зерна (середнє значення розмірів зерен на визначеній площі поверхні матеріалу), а отже, і для спрощення розв'язку задач технічної діагностики також вводимо усереднений розмір s_a площі кожного мікроруйнування і амплітуди A_a імпульсів AE, що йому відповідають, тобто

$$s_i \approx const = s_a$$
, $A_i \approx const = A_a$, $S(t) = s_a n(t) = \beta \sum_{i=1}^n A_i \approx \beta A_a n(t)$. (13)

Таким чином, приймаємо пропорційну залежність між підростанням тріщини і накопиченням імпульсів АЕ, що підтверджено також результатами експериментів [21, 22]. Тоді можемо записати залежність

$$S = n / k , \qquad (14)$$

де $k = 1/\beta A_a$ – коефіцієнт пропорційності.

Звідси рівняння (10) можемо подати у вигляді

$$\dot{n} = \frac{dn}{dt} = \alpha_1 hk \cdot \frac{K_1^2(n) - K_{scc}^2}{K_{1C}^2 - K_1^2(n)} \,. \tag{15}$$

Співвідношення (15) описує еталонну аналітичну акустограму під час поширення корозійно-механічної тріщини в тонкостінному елементі конструкції з прямолінійною плоскою тріщиною нормального відриву. Водночає величину \dot{n} отримаємо з акустограми, знятої з об'єкта контролю.

Для наскрізної тріщини в пластині коефіцієнт інтенсивності напружень [25] з урахуванням рівності (12) набуде вигляду

$$K_{\rm I} = \sigma \sqrt{\pi l} = \sigma \sqrt{\pi h^{-1} S} = \sigma \sqrt{\pi h^{-1} k^{-1} n} , \qquad (16)$$

де *l* – довжина тріщини; σ – напруження в площині тріщини.

3 урахуванням (16) рівняння (15) запишемо так:

$$\frac{dn}{dt} = \alpha_1 h k \cdot \frac{\sigma^2 \pi h^{-1} k^{-1} n - K_{scc}^2}{K_{IC}^2 - \sigma^2 \pi h^{-1} k^{-1} n}.$$
(17)

Проінтегрувавши рівняння (17) за умов

$$t = 0, \ n(0) = n_0, \ t = t_1, \ n(t_1) = n_1,$$
 (18)

отримаємо співвідношення для визначення часу підростання тріщини

$$t_1 = \frac{1}{\alpha_1 h} \left[\frac{K_{1C}^2 - K_{scc}^2}{\sigma^2 \pi h^{-1}} \cdot \ln \left(\frac{\sigma^2 \pi k^{-1} h^{-1} n_1 - K_{scc}^2}{\sigma^2 \pi k^{-1} h^{-1} n_0 - K_{scc}^2} \right) - k^{-1} (n_1 - n_0) \right].$$
(19)

Якщо замість n_1 підставити граничне значення n_* кількості імпульсів AE, то співвідношення (19) визначатиме залишковий ресурс t_* пластини. Величину n_* знаходимо з силового критерію Ірвіна: $K_{I}(\sigma, n_*) = K_{IC}$. Рівняння (15) і (19) дають можливість оцінити залишковий ресурс об'єкта контролю за параметрами акустограми, а також встановити як характер навантаження пластини, так і розмір тріщини. Зокрема, величину n_0 знаходимо наближено з розв'язку рівняння (19):

$$n_{0} \approx \frac{\pi h^{-1} k^{-1} \sigma^{2} n_{1} - K_{scc}^{2} + K_{scc}^{2} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_{1} \pi}{K_{IC}^{2} - K_{scc}^{2}} t_{1} \sigma^{2}\right)}{\pi h^{-1} k^{-1} \sigma^{2} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_{1} \pi}{K_{IC}^{2} - K_{scc}^{2}} t_{1} \sigma^{2}\right)}.$$
 (20)

Щоб визначити напруження в площині тріщини досліджуваного об'єкта, за певний період часу розшифровуємо акустограму, зняту безпосередньо з об'єкта контролю і знаходимо швидкість імпульсів AE за час t_1 . Накладаємо це значення на еталонну акустико-кінетичну діаграму поширення корозійно-механічної тріщини (див. рисунок) і визначаємо коефіцієнт інтенсивності напружень K_I у цей момент часу. Знаючи значення K_I і враховуючи співвідношення (16), отримаємо рівність

$$\sigma = K_{\rm I} / \sqrt{\pi h^{-1} k^{-1} n_0} \ . \tag{21}$$

Отже, за допомогою рівнянь (17) і (19) кінцево отримали два рівняння (20), (21), з розв'язку яких можемо визначити початковий розмір тріщини і напруження в її площині для досліджуваного об'єкта. Таким чином, співвідношення (19)–(21) при $n_1 = n_*$ представляють математичну задачу для прогнозування залишкового ресурсу t_* досліджуваного об'єкта.

Числовий експеримент. Застосовуючи співвідношення (19)–(21) при $n_1 = n_*$, виконали числовий експеримент для визначення залишкового ресурсу конкретного об'єкта контролю – пластини товщини $h = 6,8 \cdot 10^{-3}$ mm зі сталі 45ХН2МФА. Вважаємо, що пластина послаблена наскрізною плоскою прямолінійною тріщиною і знаходиться в стані довготривалого статичного розтягу в умовах дії дистильованої води. Характеристики тріщиностійкості і механічні параметри цієї сталі визначаємо на основі результатів [26]: $\alpha_1 = 8,3 \cdot 10^{-4}$ m/h, $K_{scc} = 9$ MPa·m^{1/2}, $K_{IC} =$ = 60 MPa·m^{1/2}. При цьому коефіцієнт пропорційності $k = 1,84 \cdot 10^{10}$. Далі вибираємо параметри акустограми, знятої під час поширення тріщини в пластині. Нехай запис акустограми на пластині тривав $t_1 = 73$ h, при цьому дані акустограми такі: $\dot{n} = 1800$ imp/h, $n_1 = 5,29 \cdot 10^5$. Порівнюючи параметр \dot{n} AE з еталонною акустикокінетичною діаграмою поширення корозійно-механічної тріщини зі сталі 45ХН2МФА (див. рисунок), знайдемо, що $K_1 = 11,86$ МРа·m^{1/2}. Далі, підставивши ці результати у співвідношення (20) і (21), отримаємо систему двох рівнянь для знаходження кількості імпульсів n_0 AE і напруження σ

$$\begin{cases} n_0 = \frac{4 \cdot 10^7 (0,013\sigma^2 - 81 + 81 \cdot \exp[5,43 \cdot 10^{-5}\sigma^2])}{\sigma^2 \cdot \exp[5,43 \cdot 10^{-5}\sigma^2]} \\ \sigma = 75024, 8 / \sqrt{n_0}. \end{cases}$$
(22)

З розв'язку системи отримали: $n_0 = 1,73 \cdot 10^5$ imp, $\sigma = 180$ MPa. Далі, знаючи напруження, з критерію Ірвіна і рівності (16) знайшли, що $n_* = 4,44 \cdot 10^6$. Таким чином, підставляючи ці результати в співвідношення (19), визначили залишковий ресурс пластини ($t_* = 128$ h).

висновки

Розроблено акустико-емісійний метод для визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій за дії довготривалого статичного навантаження і корозивного середовища. При цьому розмір початкової корозійно-механічної тріщини і напруження в площині тріщини пластини визначали за параметрами акустограми. Застосування методу продемонстровано під час числового експерименту для пластини зі сталі 45ХН2МФА. Цим методом оцінено залишковий ресурс пластини за дії дистильованої води.

- Панасюк В. В. Дмитрах І. М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 1999. – 340 с.
- 2. *Романив О. Н., Никифорчин Г. Н.* Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 294 с.
- 3. Arnoux P. Atomistic simulations of stress corrosion cracking // Corr. Sci. 2010. 52.

– P. 1247–1257.

- Sieradzki K. and Newman R. C. Stress-corrosion cracking // J. Phys. Chem. Solids. 1987. – 48, № 11. – P. 101–113.
- Назарчук З. Т., Скальський З. Т., Селівончик Т. В. Акустико-емісійне діагностування корозійно-водневого розтріскування конструкційних сталей. – К.: Наук. думка, 2019. – 256 с.
- Nazarchuk Z., Skalskyi V., and Serhiyenko O. Acoustic emission. Methodology and Application. – Cham: Springer Int. Publ. AG, 2017. – 283 p.
- Skalskyi V. R., Andreikiv O. E., and Serhienko O. M. Investigation of the plastic deformation of materials by the acoustic emission method (review) // Materials Science. – 2003. – 39, № 1. – P. 86–107.
- 8. Ziehl P. and El Batanouny M. 10-Acoustic emission monitoring for corrosion damage detection and classification // In book Corrosion of Steel in Concrete Struct. 2016. P. 193–209.
- Acoustic Emission Monitoring of Stress Corrosion Cracking / W. W. Gerberich, R. H. Jones, M. A. Friesel, and A. Nozue // Mat. Sci. and Eng. – 1988. – A103. – P. 185–191.
- Jomdechaa C., Prateepasena A., and Kaewtrakulpongb P. Study on source location using an acoustic emission system for various corrosion types // NDT&E Int. – 2007. – 40. – P. 584–593.
- 11. Alvarez M.G., Lapitz P., and Ruzzante J. Analysis of acoustic emission signals generated from SCC propagation // Corr. Sci. 2012. 55. P. 5–9.
- 12. *Назарчук 3. Т., Скальський 3. Т.* Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. пос. у 3-х т. Т. 3.: Засоби та застосування методу акустичної емісії. К.: Наук. думка, 2009. 328 с.
- Скальський В. Р., Коваль П. М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Методологічні аспекти відбору та обробки інформації. Львів: Сполом, 2005. – 396 с.
- 14. Болотин Ю. И., Маслов Л. А., Полунин В. И. Установление корреляций между размером трещины и амплитудой импульсов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1975. № 4. С. 119–122.
- 15. Gerberich W. W., Atteridge D. G., and Lessar J. F. An acoustic emission investigation of microscopic ductile fracture // Metallurgical Transact. A. 1975. **6A**, № 2. P. 797–801.
- Radon I. C. and Pollock A. A. Acoustic emission and energy transfer during crack propagation // Eng. Fract. Mech. – 1972. – 4, № 2. – P. 295–310.
- Prediction of fatigue crack growth in steel bridge components using acoustic emission / J. Yu, P. Ziehl, B. Zarate, and J. Caicedo // J. of Constructional Steel Res. – 2011. – 67. – P. 1254–1260.
- 18. Lysak M. V. Development of the theory of acoustic emission by propagating cracks in terms of fracture mechanics // Eng. Fract. Mech. 1996. 55, № 3. P. 443–452.
- 19. *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, and Yu. Ya. Matviiv // Materials Science. 2014. **50**, № 2. P. 201–211.
- Andreikiv O. Y., Skalskyi V. R., and Dolinska I. Y. Theoretical Foundations of the Method of Acoustic Emission for the Diagnostics of Delayed Fracture of Materials // Materials Science. - 2021. - 57, № 3. - P. 355-365.
- Quantitatively related acoustic emission signal with stress corrosion crack growth rate of sensitized 304 stainless steel in high-temperature water / Zhen Zhang, Ziyu Zhang, Jibo Tan, Xinqiang Wu // Corr. Sci. – 2019. – 157. – P. 79–86.
- Evaluation of stress corrosion cracking phenomenon in an AISI type 316LN stainless steel using acoustic emission technique / H. Shaikh, R. Amirthalingam, T. Anita, N. Sivaibharasi, T. Jaykumar, P. Manohar, and H.S. Khatak // Corr. Sci. – 2007. – 49. – P. 740–765.
- 23. Andreikiv O. E. and Sas N. B. Subcritical growth of a plane crack in a three-dimensional body under the conditions of high-temperature creep // Materials Science. 2008. 44, № 2. P. 163–174.
- 24. Andreikiv O. E. and Tym'yak N. I. Electrochemical model of local corrosion at the tip of a loaded crack // Materials Science. 1995. **30**, № 19. P. 19–24.
- 25. Саврук М. П. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. К.: Наук. думка, 1988. 620 с.
- 26. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. Т. 4.: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин, Н. А. Махутов, М. М. Стадник. – К.: Наук. думка, 1990. – 660 с.

Одержано 01.08.2022