

УДК: 539.375;539.4

АКУСТИКО-ЕМІСІЙНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ТРІЩИНАМИ ПОВЗУЧОСТІ ЗА СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

О. Є. АНДРЕЙКІВ¹, І. Я. ДОЛІНСЬКА², Н. С. ЗВЯГІН¹, М. О. ЛЮБЧАК²

¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка;

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

Розроблено акустико-емісійний метод визначення залишкового ресурсу енергетичного обладнання з тріщинами високотемпературної повзучості за довготривалого статичного навантаження розтягом, в основі якого – запропонований раніше авторами спосіб побудови еталонної акустико-кінетичної діаграми росту такої тріщини в такому ж матеріалі, як і досліджуваній, а також схема еталонної аналітичної акустограми цього процесу. Вважали, що об'єкт руйнується шляхом розвитку в ньому уже наявних плоских тріщин в полі нормальних розтягальних напружень. Початкову площу тріщини і навантаження об'єкта визначено за параметрами акустограми, записаної під час її поширення в дослідженому об'єкті. Для демонстрації застосування методу виконано числовий експеримент.

Ключові слова: тріщина високотемпературної повзучості, акустична емісія, залишковий ресурс, еталонна акустико-кінетична діаграма поширення тріщини високотемпературної повзучості, схема еталонної аналітичної акустограми під час поширення такої тріщини.

An acoustic-emission method for determining the residual life time of power equipment with high-temperature creep cracks under long-term static tensile load has been developed. This method is based on the previously proposed method of constructing a reference acoustic-kinetic diagram of the propagation of a high-temperature creep crack in the same material as the object under study, as well as a scheme of a reference analytical acousogram during crack propagation. The essence of the method is as follows. It is believed that the object fracture takes place by the propagation of already existing plain cracks in it, near which there are normal tensile stresses. It is proposed to determine the initial area of the crack and the load of the object based on the parameters of the acousogram recorded during crack propagation in the investigated object. The numerical experiment was conducted to demonstrate the application of this method.

Keywords: high-temperature creep crack, acoustic emission, residual resource, reference acoustic-kinetic diagram of high-temperature creep crack propagation, scheme of the reference analytical acousogram for high-temperature creep crack propagation.

Вступ. Елементи конструкцій енергетичного обладнання, особливо теплових та атомних електростанцій, експлуатуються за дії довготривалих навантажень і високих температур. Втрата міцності і вичерпання їх ресурсу відбуваються шляхом зародження і докритичного росту тріщин високотемпературної повзучості. Щоб передбачити таке руйнування і запобігти цьому, виконують профілактичні огляди і діагностують відповідальні (несучі) елементи конструкцій. Проте найчастіше неможливо візуально проконтролювати появу і розвиток тріщин, коли вони зароджуються всередині матеріалу або ускладнений доступ до об'єкта контролю. Тоді для локації тріщиноподібних дефектів найдоступніший метод

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

акустичної емісії (АЕ) [1–7], який вигідно вирізняється від інших методів неруйнівного контролю високою чутливістю та можливістю дистанційно контролювати весь об'єм матеріалу [5, 6].

Для оцінювання стану матеріалу і дефектності елементів конструкцій його застосовують давно [5], але за результатами цих досліджень можна лише якісно діагностувати такі процеси. Побудовано також аналітичні залежності між параметрами руйнування (ріст тріщин) матеріалу і акустограм, що записані під час поширення тріщин [8–13]. Однак для інженерної практики важливо після діагностики оцінити кількісно безпечний залишковий ресурс елемента конструкції, урахувавши стан його матеріалу і дефектність. Для цього слід побудувати відповідні математичні моделі розвитку руйнування (росту тріщин) елементів конструкцій в умовах експлуатації, які б пов'язували параметри дефектів і акустограм. Раніше [13, 14] під час розроблення теоретичних засад методу АЕ (кінетична діаграма росту тріщин за дії різних фізико-хімічних чинників), діагностування заповільненого руйнування матеріалів, використовували лінійну залежність між площею тріщин і сумою імпульсів АЕ за їх утворення. Підтвердили цю гіпотезу під час експериментальних досліджень росту корозійних тріщин [4, 15, 16], де спостерігали майже пропорційну залежність між її площею і сумою імпульсів АЕ.

Нижче, з допомогою енергетичного підходу [17] і цієї гіпотези побудували акустико-емісійну теорію і виконали числовий експеримент з визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за дії довготривалого статичного навантаження і високих температур. В основі теорії – еталонна акустико-кінетична діаграма поширення тріщини високотемпературної повзучості (залежність швидкості імпульсів АЕ від коефіцієнта інтенсивності напружень (K_I)), а також схема відповідної еталонної аналітичної акустограми. Раніше [13] таку еталонну діаграму побудовано для сталі 12Х1МФ як залежність інтенсивності dn/dt імпульсів АЕ від K_I (рис. 1). При цьому приймали гіпотезу існування лінійної залежності між акустичною і механічною кінетичними діаграмами росту тріщини за довготривалого статичного навантаження, яку підтверджують результати експериментів [4, 15]. Акустико-кінетична діаграма на рис. 1 еталонна для акустограми, знятої безпосередньо з об'єкта контролю для даного матеріалу, і дає можливість встановити рівень його навантаження і розмір тріщини.

Побудова АЕ теорії прогнозування залишкового ресурсу елементів конструкцій за високотемпературної повзучості. Сформулюємо загальну модель для визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за дії довготривалого статичного навантаження і високої температури. Але для простоти і розуміння викладу матеріалу продемонструємо її застосування для труби товщиною h , що піддана дії внутрішнього постійного тиску і високої температури, коли реалізується високотемпературна повзучість. Вважаємо, що на внутрішній стінці труби є поверхнева півеліптична тріщина, близька за контуром до півкругової, яка розви-

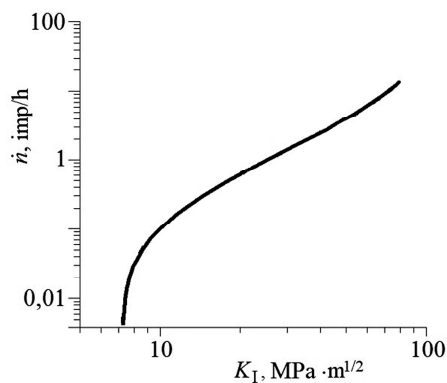


Рис. 1. Кінетична діаграма росту тріщини високотемпературної повзучості в координатах швидкість рахунку імпульсів АЕ–коефіцієнт інтенсивності напружень, $\dot{n} - K_I$.

Fig. 1. Kinetic diagram of the high-temperature creep crack growth in the coordinates rate of AE pulse count–stress intensity factor, $\dot{n} - K_I$.

вається в умовах дії зовнішніх чинників. Необхідно визначити залишковий ресурс труби, тобто час $t = t_*$, за який тріщина проросте крізь її стінку і відбудеться розгерметизація. Для розв'язку цієї задачі слід сформулювати розрахункову модель руйнування труби, а також визначити рівень її навантаження, локацію і розмір тріщини. Щоб отримати ці параметри, застосуємо метод АЕ. Для цього на трубі розмістимо первинні перетворювачі і, використовуючи математичний метод триангуляції, визначимо локацію тріщини як джерело АЕ. Впродовж часу t_1 у місці локації тріщини запишемо акустограму її поширення з такими параметрами, як швидкість рахунку і сума імпульсів АЕ. Далі порівняємо ці дані із раніше побудованою для даного матеріалу в лабораторних умовах еталонною акустико-кінетичною діаграмою росту тріщини високотемпературної повзучості (рис. 1) і визначимо КІН. Тепер для розв'язку задачі побудуємо розрахункову модель руйнування труби, тобто схему еталонної аналітичної акустограми поширення такої тріщини, яка пов'язуватиме силові параметри руйнування з характеристиками АЕ.

Формулювання розрахункової моделі. За відомими результатами [17] визначимо кінетику росту плоскої тріщини високотемпературної повзучості з геометрично змінним контуром в силових параметрах

$$\frac{dS}{dt} = \frac{A \int [K_I(\xi) K_{IC}^{-1}]^{2m} d\xi}{L \left(1 - K_{IC}^{-2} \left(\int_L K_I^2(\xi) d\xi \right)^{-1} \int_L K_I^4(\xi) d\xi \right)} \quad (1)$$

з початковою і кінцевою умовами

$$t = 0, \quad S(0) = S_0; \quad t = t_*, \quad S(t_*) = S_*; \quad K_I(S_*) = K_{IC}. \quad (2)$$

Тут $K_I(\xi)$ – біжуче значення КІН біля контуру тріщини; K_{IC} – його критичне значення; ξ – біжуча координата вздовж контуру тріщини L ; A, m – характеристики високотемпературної повзучості матеріалу, які визначають із експерименту; S_0, S_* – початкова і гранична площі тріщини.

Рівняння (1) з умовами (2) – замкнута математична модель для встановлення залишкового ресурсу елементів конструкцій з тріщинами високотемпературної повзучості, яку реалізувати досить складно. Для її спрощення застосуємо відомий метод еквівалентних площ [17], за яким швидкість зміни площі S такої тріщини за однорідного розтягу труби незначно залежить від конфігурації її контуру (у даному випадку – поверхневої). Тому конфігурацію контуру замінюємо півкровою радіусом ρ з вихідною площею, що рівна вихідній досліджуваного дефекту $S = S_0$. Тепер математична модель (1), (2) набуде вигляду

$$\frac{dS}{dt} = \frac{A \sqrt{2\pi S} \cdot [K_I(S) K_{IC}^{-1}]^{2m}}{1 - K_I^2(S) K_{IC}^{-2}}, \quad (3)$$

$$t = 0, \quad S(0) = S_0; \quad t = t_*, \quad S(t_*) = 0,5\pi h^2. \quad (4)$$

КІН $K_I(S)$ у рівнянні (3) змінюється вздовж контуру тріщини, що суттєво ускладнює задачу. Тому з невеликою похибкою, яка піде в запас залишкового ресурсу труби, вибираємо його сталим з максимальним значенням, яке знаходимо так [18]:

$$K_I(S) = 0,7\sigma \sqrt{2\pi S} (1 + 0,64\pi^{-1} h^{-2} S) (1,04 + 0,46\pi^{-1} h^{-2} S - 0,44\pi^{-2} h^{-4} S^2), \quad (5)$$

де σ – напруження в площині тріщини.

Щоб визначити залишковий ресурс труби за моделлю (3), (4), необхідно знати розмір поверхневої тріщини і напружено-деформований стан біля неї, який характеризує КІН. Їх знаходимо так. Відомо [12], що площу підростання тріщини можна пов'язати зі середньою амплітудою A_i імпульсу АЕ:

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

де β – акустико-емісійна константа матеріалу, яку обчислюють із експерименту [12]; n – кількість імпульсів АЕ, зареєстрованих під час поширення тріщини. Для коректності математичної постановки задачі, як і в працях [13, 14], вважаємо справедливим таке припущення. Усреднюємо площі мікроруйнувань (стрибки підростання тріщини) і амплітуди імпульсів АЕ, що їх супроводжують, тобто

$$s_i \approx \text{const} = s_a, \quad A_i \approx \text{const} = A_a, \quad S(t) = s_a n(t) = \beta \sum_{i=1}^n A_i \approx \beta A_a n(t). \quad (7)$$

Таким чином, приймаємо пропорційну залежність між підростанням тріщини і накопиченням імпульсів АЕ, що також підтверджено експериментально [15, 16]. Тепер на основі виразів (6), (7) можемо записати залежність

$$S = n/k, \quad (8)$$

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

З урахуванням (8) рівняння (5) запишемо у вигляді

$$\dot{n} = \frac{dn}{dt} = \frac{Ak\sqrt{2\pi nk^{-1}} \cdot [K_I(n)K_{IC}^{-1}]^{2m}}{1 - K_I^2(n)K_{IC}^{-2}}. \quad (9)$$

Співвідношення (9) описує еталонну аналітичну акустико-кінетичну діаграму росту тріщини за дії довготривалого статичного навантаження і високої температури. Значення \dot{n} також одержимо з акустограми, знятої з труби.

При цьому КІН (5) з урахуванням рівності (8) набуде вигляду

$$K_I(n) = 0,7\sigma^4\sqrt{2\pi nk^{-1}} \left(1 + \frac{0,64n}{\pi h^2 k} \right) \cdot \left(1,04 + \frac{0,46n}{\pi h^2 k} - \frac{0,44n}{\pi^2 h^4 k^2} \right). \quad (10)$$

Проінтегрувавши рівняння (9) за умов

$$t = 0, \quad n(0) = n_0, \quad t = t_1, \quad n(t_1) = n_1, \quad (11)$$

визначимо час підростання тріщини:

$$t_1 = B \cdot \left[\frac{1,2536\sigma^2\sqrt{2\pi k^{-1}}}{(m-2)} \left(\frac{n_1}{\sqrt{n_1}^m} - \frac{n_0}{\sqrt{n_0}^m} \right) - \frac{2K_{IC}^2}{(m-1)} \left(\frac{\sqrt{n_1}}{\sqrt{n_1}^m} - \frac{\sqrt{n_0}}{\sqrt{n_0}^m} \right) \right], \quad (12)$$

$$B = K_{IC}^{2m-2} A^{-1} k^{-1} \left(\sqrt{2\pi k^{-1}} \right)^{-1} \cdot \left(0,79\sigma^4\sqrt{2\pi k^{-1}} \right)^{-2m}.$$

Водночас співвідношення (12), якщо $n_1 = n_*$, де $n_* = 0,5\pi h^2 k$ – гранична кількість імпульсів АЕ, визначатиме залишковий ресурс t_* труби. Отже, рівняння (9) і (12) за умов (11) дають можливість спрогнозувати залишковий ресурс труби за параметрами акустограми, а також встановити характер її навантаження і розмір тріщини. Зокрема, величину n_0 знаходимо наближено з розв'язку рівняння (12):

$$n_0 \approx \left(\exp \left(0,5(m-1)^{-1} (m \ln(n_1) + \right. \right. \\ \left. \left. + 2 \ln \left(BK_{IC}^2 \left(2BK_{IC}^2 \sqrt{n_1} + (m-1)t_1 \sqrt{n_1}^m \right)^{-1} \right) + 1,386 \right) \right) \right)^2. \quad (13)$$

Для розрахунку напружень σ у площині тріщини чинимо так. За час t_1 запису акустограми визначаємо швидкість рахунку імпульсів АЕ \dot{n} , порівнюємо її зі значенням на еталонній акустико-кінетичній діаграмі поширення тріщини (див. рис. 1) і обчислюємо коефіцієнт K_I . За відомого значення K_I зі співвідношення (10) знаходимо напруження

$$\sigma = K_I / \left(0,7 \sqrt[4]{2\pi n_0 k^{-1}} \left(1 + \frac{0,64n_0}{\pi h^2 k} \right) \cdot \left(1,04 + \frac{0,46n_0}{\pi h^2 k} - \frac{0,44n_0}{\pi^2 h^4 k^2} \right) \right). \quad (14)$$

Отже, з рівнянь (9) і (12) отримали рівняння (13), (14) для визначення напруження в площині тріщини і кількості n_0 імпульсів АЕ, що відповідає її початковій площі. Таким чином, за співвідношеннями (12)–(14), якщо $n_1 = n_*$, визначимо залишковий ресурс t_* труби.

Числовий експеримент. На основі співвідношень (12)–(14) виконаємо числовий експеримент, щоб встановити залишковий ресурс труби завтовшки $h = 16$ mm і радіусом $r = 64$ mm зі сталі 12X1MФ. Вважаємо, що труба послаблена внутрішньою поверхневою тріщиною і знаходиться під дією постійного внутрішнього тиску в умовах високої температури. При цьому характеристики тріщиностійкості і високотемпературної повзучості сталі визначаємо на основі відомих результатів [19]: $m = 0,86$, $A = 1,79 \cdot 10^{-4}$ m/h, $K_{IC} = 120$ МПа \cdot m^{1/2}. Коефіцієнт пропорційності $k = 13157894$ [13]. Параметри акустограми поширення тріщини такі: $t_1 = 124$ h, $\dot{n} = 0,1$ imp/h, $n_1 = 340$. Порівнюючи параметр \dot{n} АЕ з його значенням на еталонній акустико-кінетичній діаграмі (див. рис. 1), знайдемо величину $K_I = 10$ МПа \cdot m^{1/2}. Підставляючи характеристики матеріалу і параметри акустограми у співвідношення (13), (14), отримуємо систему двох рівнянь для знаходження кількості n_0 імпульсів АЕ і напруження σ :

$$\begin{cases} n_0 \approx \left(\exp \left(-23,1 - 7,23 \ln \left(\frac{2,96 \cdot 10^{15}}{1,59 \cdot 10^9 \sigma^{1,723} (6,87 \cdot 10^7 \sigma^{-1,723} - 211,3)} \right) \right) \right) \right)^2, \\ \sigma = 480,54 / \sqrt[4]{n_0}. \end{cases} \quad (15)$$

З розв'язку системи (15) маємо: $n_0 = 288,86$ imp, $\sigma = 116,56$ МПа. Підставляючи ці дані в співвідношення (12) при $n_1 = n_* = 5288$, визначимо залишковий ресурс труби $t_* = 2396$ h за дії постійного внутрішнього тиску і високої температури. Однак цю задачу методом еквівалентних площ розв'язали наближено. Тому виникає питання, чи з достатньою точністю для інженерної практики можемо приймати отриманий розв'язок. Щоб перевірити його коректність, розв'яжемо суто механічну задачу про визначення залишкового ресурсу труби точнішим числовим методом Рунге–Кутта.

Встановлення періоду докритичного росту тріщини методом Рунге–Кутта. Дослідимо трубу з внутрішнім радіусом r та товщиною h , яка піддана дії

внутрішнього довготривалого статичного тиску p і високої температури. Вважаємо, що на внутрішній стінці вздовж твірної труби розміщена поверхнева півеліптична тріщина з півсями a_0 і b_0 з площею S_0 . В умовах дії зовнішніх чинників, за яких реалізується високотемпературна повзучість, тріщина поширюватиметься і труба втратить герметичність. Необхідно визначити час $t = t_*$, коли її площа S внаслідок високотемпературної повзучості підросте до критичного розміру $S = S_*$, тобто $b(t_*) = h$, і труба розгерметизується.

Для розв'язку задачі застосуємо точніший проти методу еквівалентних площ метод Рунге–Кутта. Вважаючи, що контур тріщини під час її поширення залишатиметься півеліптичним, зводимо задачу до системи двох диференціальних рівнянь поширення півосей еліпса

$$\begin{aligned}\frac{da}{dt} &= AK_{IA}^{2m} K_{IC}^{-2m} \cdot \left[1 - K_{IA}^2 K_{IC}^{-2}\right]^{-1}, \\ \frac{db}{dt} &= AK_{IB}^{2m} K_{IC}^{-2m} \cdot \left[1 - K_{IB}^2 K_{IC}^{-2}\right]^{-1}\end{aligned}\quad (16)$$

за початкових і кінцевих умов

$$t = 0, \quad a(0) = a_0, \quad b(0) = b_0; \quad t = t_*, \quad b(t_*) = h. \quad (17)$$

Як відомо [18], КІН для півеліптичної тріщини можна подати так:

$$K_{IA} = prh^{-1} \sqrt{\pi b} (M/\Phi) L; \quad K_{IB} = prh^{-1} \sqrt{\pi b} (M/\Phi), \quad (18)$$

де

$$\begin{aligned}M &= \left(1,13 - 0,09 \frac{b}{a}\right) + \left(-0,54 + \frac{0,89}{0,2 + b/a}\right) \left(\frac{b}{h}\right)^2 + \\ &+ \left(0,5 - \frac{1}{0,65 + b/a} + 14 \left(1 - \frac{b}{a}\right)^{2,4}\right) \left(\frac{b}{h}\right)^4,\end{aligned}$$

$$\Phi^2 = 1 + 1,464 \cdot (b/a)^{1,65}, \quad L = (1,1 + 0,35(b/h)^2) \sqrt{b/a}.$$

Проаналізуємо конкретний випадок, коли досліджувана труба виготовлена зі сплаву IN-100, для якого [20] $K_{IC} = 142 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, $\alpha_0 = 0,1$, $A \approx 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м/л}$, $m \approx 4$. Вважаємо, що вона експлуатується за температури $T_0 = 732^\circ \text{С}$, має геометричні параметри $h_1 = 16 \text{ мм}$, $r = 64 \text{ мм}$ і навантажена тиском $p = 200 \text{ МПа}$. Підставляючи ці результати і співвідношення (18) у систему (16) і розв'язуючи її методом Рунге–Кутта за умов (17), визначимо залишковий ресурс труби (рис. 2 крива 2).

Водночас цю задачу розв'яжемо наближено методом еквівалентних площ, замінюючи півеліптичну тріщину півкруговою радіусом c тієї самої площі. При цьому для коректного застосування методу вважаємо, що тріщина досить мала і піввісь b набагато менша за товщину труби h ($b \ll h$), а співвідношення $b/a > 0,5$. Враховуючи це, задачу зводимо до розв'язку такої математичної моделі:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = Ah^{-1} K_I^{2m} K_{IC}^{-2m} \left[1 - K_I^2 K_{IC}^{-2}\right]^{-1}, \quad (19)$$

$$t = 0, \quad \varepsilon(0) = \varepsilon_0; \quad t = t_*, \quad \varepsilon(t_*) = 1, \quad (20)$$

де

$$\varepsilon = c/h; \quad K_1 = 0,7 prh^{-1} \sqrt{\pi h \varepsilon} (1 + 0,32\varepsilon^2) (1,04 + 0,23\varepsilon^2 - 0,11\varepsilon^4). \quad (21)$$

За заданих вище параметрів геометрії і навантаження труби розв'язок задачі (19)–(21) подамо графічно (рис. 2, крива 1).

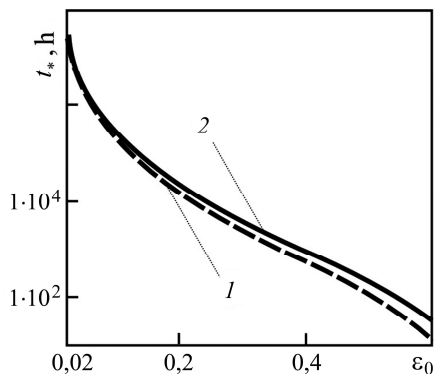


Рис. 2. Залежність залишкового ресурсу труби t_* від безрозмірного початкового розміру тріщини ε_0 : 1 – метод еквівалентних площ; 2 – метод Рунге–Кутта.

Fig. 2. Dependence of residual life t_* of pipe on the dimensionless value of the initial crack size ε_0 : 1 – equivalent area method; 2 – Runge–Kut method.

Виявили, що метод еквівалентних площ проти методу Рунге–Кутта досить простий у застосуванні і дає достатню для інженерної практики точність з похибкою, що йде в запас довговічності.

ВИСНОВКИ

З допомогою енергетичного підходу і методу акустичної емісії розроблено метод для оцінювання залишкового ресурсу елементів конструкцій, підданих дії довготривалого статичного навантаження і високої температури. При цьому розмір тріщини і напруження в її площині запропоновано визначати за параметрами акустограми, знятої з досліджуваного елемента конструкції. На основі запропонованого методу і наближеного методу еквівалентних площ виконано числовий експеримент для визначення залишкового ресурсу труби зі сталі 12Х1МФ за дії постійного внутрішнього тиску і високої температури. Ефективність методу еквівалентних площ підтверджено результатами прогнозу залишкового ресурсу труби, отриманого числовим методом Рунге–Кутта.

1. 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.
2. An evaluation of the creep characteristics of an AZ91 magnesium alloy composite using acoustic emission / F. Chmelik, P. Lukáč, M. Janecek, F. Moll, B. L Mordike, K.-U. Kainer, and T. G Langdon // *Mat. Sci. and Eng.: A*. – 2002. – **338**, № 1; 2. – P. 1–7.
3. Magalhaes A. G. and M. F. S. F. de Moura. Application of acoustic emission to study creep behaviour of composite bonded lap shear joints // *NDT & E Int.* – 2005. – **38**, № 1. – P. 45–52.
4. Acoustic emission monitoring of stress corrosion cracking / W. W. Gerberich, R. H. Jones, M. A. Friesel, and A. Nozue A // *Mat. Sci. and Eng.* – 1988. – **A103**. – P. 185–191.
5. Назарчук З. Т., Скальський З. Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій // *Наук.-техн. пос. у 3-х т.* – К.: Наук. думка, 2009. – Т. 3.: Засоби та застосування методу акустичної емісії. – 328 с.
6. 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.
7. Acoustic emission response to erosion-corrosion and creep damage in pipeline systems / L. Nohal, P. Mazal, F. Vlasic, and M. Svobodova // *Proc. Struct. Integrity*. – 2019. – **23**. – P. 227–232.
8. 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.

9. 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.
10. Radon I. C. and Pollock A. A. Acoustic emission and energy transfer during crack propagation // Eng. Fract. Mech. – 1972. – **4**, № 2. – P. 295–310.
11. Prediction of fatigue crack growth in steel bridge components using acoustic emission / J. Yu, P. Ziehl, B. Zarate, and J. Caicedo // J. of Construct. Steel Res. – 2011. – **67**. – P. 1254–1260.
12. 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.
13. 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. – **57**, № 3. – P. 355–365.
14. 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.
15. 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, and Xinqiang Wu // Corr. Sci. – 2019. – **157**. – P. 79–86.
16. 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.
17. Andreikiv O. Y. and Dolinska I. Y. Determination of the period of subcritical growth of small plane high-temperature creep cracks in structural elements // Materials Science. – 2021. – **57**, № 2. – P. 154–162.
18. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – Т. 1. – 448 с.
19. Хромченко Ф. А. Ресурс сварных соединений паропроводов. – М.: Машиностроение, 2002. – 352 с.
20. Fuji A. and Kitagawa M. A. Comparison of creep crack growth behaviour in nickel based super alloy with low alloy steel // Adv. in fracture resistance and structural integrity: Selected papers from the 8th Int. Conf. on Fract. (ICF 8), Kijev, Ukraine, 8–14 June 1993. – Pergamon, 1994. – P. 487–495.

Одержано 09.09.2022