

УДК 539.375:536.543

## ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДУ ДОКРИТИЧНОГО РОСТУ ТРІЩИН ПОВЗУЧОСТІ ЗА ПАРАМЕТРАМИ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

О. Є. АНДРЕЙКІВ<sup>1</sup>, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ<sup>2</sup>,  
І. Я. ДОЛІНСЬКА<sup>2</sup>, Ю. Я. МАТВІЇВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Львівський національний університет ім. Івана Франка;

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>3</sup> Луцький національний технічний університет

Визначено період докритичного росту тріщин низькотемпературної повзучості за параметрами сигналів акустичної емісії. Розроблено спосіб побудови кінетичних діаграм росту таких тріщин методом акустичної емісії.

**Ключові слова:** *низькотемпературна повзучість, метод акустичної емісії, період докритичного росту тріщини, кінетична діаграма росту тріщини низькотемпературної повзучості.*

Заповільнене руйнування елементів конструкцій є довготривалим, але небезпечним, бо його важко передбачити і діагностувати. Оскільки воно спричинене утворенням або об'єднанням дефектів (вакансій, дислокацій, пор, мікро- і макротріщин тощо), за яких генеруються пружні хвилі, то одним із найефективніших для діагностування заповільненого руйнування елементів конструкцій за довготривалого статичного навантаження є метод акустичної емісії (АЕ) [1–4]. Він відомий давно, але спочатку його використовували лише для якісної оцінки. Для кількісної ж необхідно встановити залежності параметрів сигналів АЕ від характеристик руйнування.

Мета дослідження – побудувати аналітичну модель для дослідження поширення тріщин низькотемпературної повзучості в конструкційних матеріалах і на цій основі оцінити процес за параметрами пружних хвиль АЕ.

**Формулювання задачі.** Визначаючи залишковий ресурс елементів конструкцій за довготривалого статичного навантаження, важливо знайти розміри вихідних дефектів і параметри кінетичних діаграм поширення тріщин низькотемпературної повзучості [5] і за встановленою раніше математичною моделлю [6] розрахувати залишковий ресурс (період докритичного росту тріщини низькотемпературної повзучості)  $t = t_*$ . Проте знайти вихідні розміри дефектів і параметри повзучості  $m$ ,  $A_{2t}$ ,  $\delta_{CC}$ ,  $\delta_{thc}$  [5] для діагностування вже експлуатованого матеріалу елемента конструкції складно [4, 5]. Тому нижче побудовано розрахункову модель визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за довготривалого статичного навантаження через параметри сигналів АЕ, які вимірюють безпосередньо на поверхні об'єкта контролю. Суть моделі ось у чому.

Розглянемо тривимірне тіло, послаблене плоскою макротріщиною площею  $S_T$  з гладким випуклим контуром  $L_T$  і в нескінченно віддалених точках розтягнуте рівномірно розподіленими довготривалими зусиллями інтенсивності  $p$ , напрямленими перпендикулярно до площини тріщини (рис. 1). Вважаємо, що тіло піддане дії однорідного низькотемпературного поля, яке в зоні передруйнування біля кон-

туру тріщини викликає низькотемпературну повзучість, що зумовлює ріст тріщини. Необхідно визначити кінетику її поширення і оцінити період докритичного росту  $t = t_*$ .

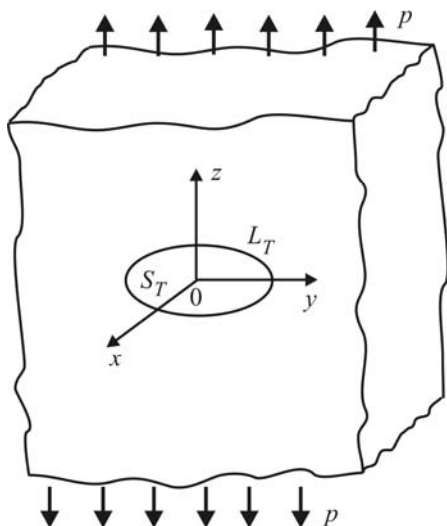


Рис. 1. Схема навантаження тіла з тріщиною.

Fig. 1. Loading of a body with a crack (schematically).

Як відомо [7], площу  $S$  новоутворених дефектів (площу підростання тріщини) можна розрахувати через суму амплітуд  $A_i$  сигналів АЕ:

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

Тут  $\beta$  – акустико-емісійна константа матеріалу, яку визначають із експерименту;  $n$  – кількість сигналів АЕ, зареєстрованих під час поширення тріщини (кожен сигнал вважатимемо відтворенням одиначної події акту руйнування матеріалу).

Показано [8], що зміна площі  $S$  плоскої тріщини повзучості незначно залежить від конфігурації її контуру за однорідного розтягу, який під час поширення тріщини наближається до колового. Тому критичну площу тріщини  $S_*$  визначатимемо з урахуванням критерію Ірвіна і розв'язку задачі Сакка:

$$S_* = 0,0625\pi^3 K_{CC}^4 p^{-4} , \quad (2)$$

де  $K_{CC}$  – верхнє порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) на кінетичній діаграмі поширення тріщини низькотемпературної повзучості [6]. Тепер на основі формул (1) і (2) запишемо рівняння для визначення кількості  $n$  сигналів АЕ, які випромінюватиме тріщина під час докритичного росту:

$$\beta \sum_{i=1}^n A_i = 0,0625\pi^3 K_{CC}^4 p^{-4} - S_T . \quad (3)$$

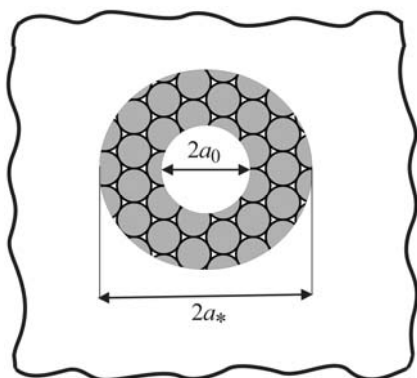


Рис. 2. Схема перерізу тіла у площині тріщини початкового радіуса  $a_0$  і кінцевого  $a_*$ :  $2a_0$  – площа початкової тріщини;  $2a_*$  – новоутворена площа за докритичного її росту; кола в кільці – площі мікротріщин, які генерують сигнали АЕ під час утворення.

Fig. 2. The body cross-section in the plane of the crack of initial radius  $a_0$  and final radius  $a_*$ :  $2a_0$  – area of the initial crack;  $2a_*$  – new-formed area under its subcritical growth; circles in the ring – areas of microcracks that generate AE signals during its formation (schematically).

Стрибки локального підростання тріщини вздовж її фронту за низькотемпературної повзучості для мікроізотропного матеріалу можна вважати наближено однаковими за різних інкубаційних періодів їх підготовки [8], а отже, і площі  $s_i$  мікроруйнування, які генерують кожну подію АЕ (приймаємо їх мікрокруговими рис. 2;  $s_i \approx \text{const} = s_a$ ). Звідси

$$A_i \approx \text{const} = A_a, \quad S(t) = s_a n(t) = \beta \sum_{i=1}^n A_i \approx \beta A_a n(t). \quad (4)$$

На основі співвідношень (3) і (4) знайдемо критичну кількість сигналів АЕ  $n = n_*$ , коли тріщина спонтанно поширюється:

$$n_* = \frac{0,0625\pi^3 K_{CC}^4 p^{-4} - S_T}{\beta A_a}. \quad (5)$$

**Аналог задачі Сакка.** Зміну площі плоскої тріщини повзучості за однорідного розтягу наближено можна описати за швидкістю її утворення. Тому розглянемо задачу про визначення періоду докритичного росту тріщини повзучості, коли її контур  $L$  є коло зі змінним радіусом  $a=a(t)$ , тобто аналог задачі Сакка для опису поширення тріщини низькотемпературної повзучості (рис. 2).

Тоді математичну задачу для визначення періоду  $t = t_*$  зведемо до вигляду [6]

$$V = \frac{da}{dt} = \frac{A_{2t} K_{CC}^{-2m} (K_I^{2m} - K_{thc}^{2m})}{1 - K_I^2 K_{CC}^{-2}}, \quad (6)$$

$$t = 0, \quad a(0) = a_0; \quad t = t_*, \quad a(t_*) = a_*; \quad K_I(a_*) = K_{CC}.$$

Звідси

$$K_I^2 = \frac{4ap^2}{\pi} = \frac{4p^2 \sqrt{S}}{\pi^{1,5}}, \quad (7)$$

де  $S = S(t)$  – поточна площа кругової тріщини, швидкість зміни якої на основі співвідношення (6) подамо так:

$$\frac{da}{dt} = \frac{0,5}{\sqrt{\pi S}} \frac{dS}{dt}. \quad (8)$$

Тепер, використовуючи залежності (7) і (8), математичну модель (6) зведемо до виду

$$\frac{dS}{dt} = \frac{2\sqrt{\pi S} A_{2t} \sqrt{S_{thc}^m S_*^{-m}} \left( \sqrt{S^m S_{thc}^{-m}} - 1 \right)}{1 - \sqrt{S S_*^{-1}}}, \quad (9)$$

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

Тут  $S(t) = S_T + S_n(t) \approx \beta A_a (n_0 + n(t))$ ;  $n_0 = S_T \beta^{-1} A_a^{-1}$ ;  $S_T$  – початкова площа тріщини;  $S_{thc}$  – максимальна площа, коли під заданим зовнішнім навантаженням  $p$  тріщина повзучості не поширюватиметься;  $S_n(t)$  – площа її підростання.

З урахуванням співвідношення (4) математичну модель (9) запишемо ще так:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{2\sqrt{\pi \beta^{-1} A_a^{-1} (n_0 + n)} A_{2t} \sqrt{n_{thc}^m (n_0 + n_*)^{-m}} \left( \sqrt{(n_0 + n)^m n_{thc}^{-m}} - 1 \right)}{1 - \sqrt{(n_0 + n)(n_0 + n_*)^{-1}}}, \quad (10)$$

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

де  $n_{thc}$  – кількість імпульсів, коли утворюється тріщина площею  $S_{thc}$ , що не поширюється під навантаженням  $p$  ( $n_{thc} = \beta^{-1} A_a^{-1} S_{thc}$ ).

Інтегруючи диференціальне рівняння (10) за заданих початкової і кінцевої умов, для визначення періоду  $t = t_*$  докритичного росту тріщини отримаємо:

$$t_* = \int_0^{n_*} \frac{0,5\sqrt{\beta A_a} (1 - \sqrt{(n_0 + n)(n_0 + n_*)^{-1}})}{\sqrt{\pi(n_0 + n)} A_{2t} \sqrt{n_{thc}^m (n_0 + n_*)^{-m} \left( \sqrt{(n_0 + n)^m n_{thc}^{-m} - 1} \right)}} dn. \quad (11)$$

Таким чином, якщо відомі характеристики  $m$ ,  $A_{2t}$ ,  $\beta$ ,  $n_{thc}$ ,  $A_a$ , то період  $t = t_*$  можна оцінити за залежністю (11). Для інженерної практики, зокрема технічної діагностики, важливо також через параметри сигналів АЕ визначити розміри дефектів, особливо площу утворюваних тріщин. За наведеними результатами можна розробити ефективний підхід, суть якого ось у чому.

Співвідношення (6) аналітично описує кінетичну діаграму росту тріщини низькотемпературної повзучості, яка в координатах  $V-K_I$  має вигляд S-подібної кривої з нижнім  $K_{thc}$  і верхнім  $K_{CC}$  пороговими значеннями КІН [5]. Середня частина діаграми в логарифмічних координатах  $\lg V - \lg K_I$ , де  $K_{thc} \ll K_I \ll K_{CC}$ , майже прямолінійна. Тут співвідношення (6) набуває вигляду

$$V \approx A_{2t} K_I^{2m} K_{CC}^{-2m} \quad (K_{thc} \ll K_I \ll K_{CC}), \quad (12)$$

тобто подібне до формули Періса, яка також описує прямолінійну ділянку, але діаграми втомного руйнування матеріалів [9].

Зі співвідношень (1), (4), (7), (8) отримаємо:

$$K_I = \frac{2p^4 \sqrt{S}}{\pi^{0,75}}, \quad V = \frac{\beta A_a \dot{n}}{2\sqrt{\pi S}}. \quad (13)$$

Тут  $A_a$  – середнє значення амплітуди сигналів АЕ, яке вважаємо константою матеріалу і визначаємо із експерименту;  $\dot{n} = dn/dt$  – інтенсивність сигналів (кількість сигналів за одиницю часу). Підставляючи залежності (13) в (12), одержимо:

$$\frac{\beta A_a \dot{n}}{2\sqrt{\pi S}} = A_{2t} K_{CC}^{-2m} \left( \frac{4p^2 \sqrt{S}}{\pi^{1,5}} \right)^m. \quad (14)$$

Звідси (14) площа тріщини

$$S \approx {}^{0,5(m+1)}\sqrt{B_0 p^{-2m} \dot{n}}, \quad (15)$$

де  $B_0$  – константа, яку визначаємо через характеристики матеріалу так:

$$B_0 = \frac{\beta A_a K_{CC}^{2m} \pi^{0,5(3m-1)}}{2^{2m+1} A_{2t}}. \quad (16)$$

Отже, якщо відомі характеристики матеріалу  $B_0$ ,  $m$  і експериментально знайдена інтенсивність сигналів АЕ  $\dot{n}$  за однорідного навантаження  $p$ , то площу  $S$  тріщини в елементі конструкції можна наближено розрахувати формулою (15), коли відсутні інші джерела сигналів АЕ.

**Аналог задачі Гріффітса.** Коли тонкостінні елементи конструкцій мають дрібні наскрізні прямолінійні тріщини і піддані дії довготривалих однорідних розтягальних зусиль, то розрахунковою моделлю тут може слугувати аналог задачі Гріффітса (рис. 3).

Розглянемо нескінченну пластину товщиною  $h_0$ , послаблену прямолінійною тріщиною початкової довжини  $2l_0$  і розтягнуту в нескінченно віддалених точках

довготривалими рівномірно розподіленими зусиллями  $p$ , що напрямлені перпендикулярно до лінії розміщення тріщини. Вважаємо, що пластина піддана дії рівномірно розподіленого температурного поля, яке викликає в зонах передруйнування біля вершин тріщини низькотемпературну повзучість. Необхідно визначити період  $t = t_*$  докритичного росту тріщини, за який вона досягне критичного розміру  $l = l_*$  і пластина зруйнується. Розв'язок задачі можна отримати за сформульованою вище математичною моделлю (6). Проте важливо побудувати її розв'язок через параметри сигналів АЕ, як це зроблено для задачі Сакка. Для цього чинимо так.

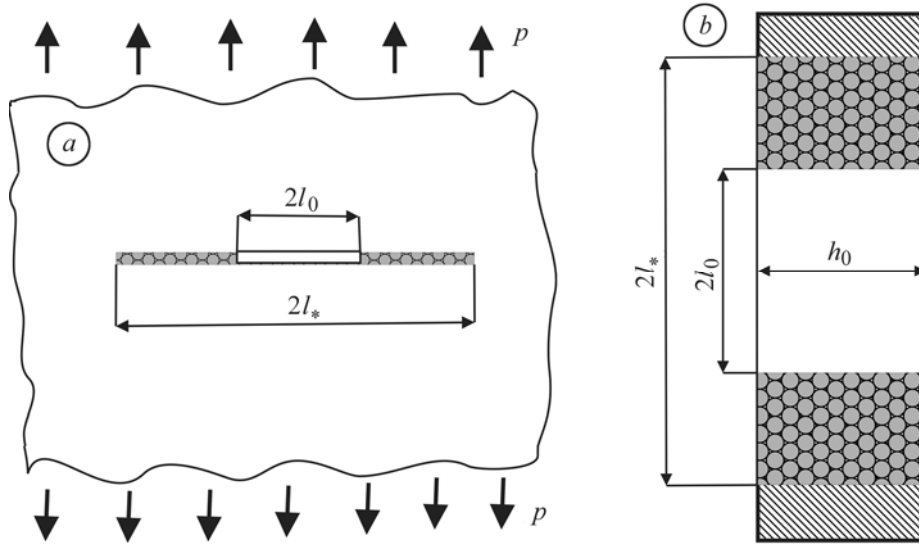


Рис. 3. Схема навантаження пластини з тріщиною (а) та її переріз у площині тріщини (b): світлий прямокутник – вихідна тріщина; прямокутники з кружечками – зони докритичного її росту.

Fig. 3. Loading of the plate with a crack (a) and its cross-section in the crack plane (b): bright rectangle – original crack; rectangles with circular hatching – zones of subcritical crack growth (schematically).

Для задачі Гріффітса швидкість  $V$  поширення тріщини і КІН можна записати [6] у вигляді

$$V = h_0^{-1} \frac{dS}{dt}, \quad K_I = p\sqrt{\pi l} = p\sqrt{\pi h_0^{-1} S}. \quad (17)$$

Тут  $h_0$  – товщина пластини;  $S$  – площа новоутвореної поверхні тріщини довжиною  $l$ . Тоді співвідношення (6) з урахуванням виразу (17) буде:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{A_{2t} h_0 K_{CC}^{-2m} ((p^2 \pi h_0^{-1} S)^m - K_{thc}^{2m})}{1 - p^2 \pi h_0^{-1} S K_{CC}^{-2}}, \quad (18)$$

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

де  $S_0 = 2l_0 h_0; \quad S_* = 2l_* h_0.$

Використовуючи співвідношення (4), математичну модель (18) для визначення періоду  $t = t_*$  запишемо через параметри сигналів АЕ:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{h_0 \beta^{-1} A_a^{-1} A_{2t} (n_0 + n_*)^{-m} n_{thc}^m ((n_0 + n)^m n_{thc}^{-m} - 1)}{1 - (n_0 + n)(n_0 + n_*)^{-1}}, \quad (19)$$

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

Для розрахунку періоду  $t = t_*$  докритичного росту прямолінійної тріщини низькотемпературної повзучості в нескінченній пластині (розв'язок аналога задачі Гріффітса) проінтегруємо рівняння (19), коли задані початкова та кінцева умови:

$$t_* = \int_0^{n_*} \frac{\beta A_a (1 - (n_0 + n)(n_0 + n_*)^{-1})}{h_0 A_{2t} n_{thc}^m (n_0 + n_*)^{-m} ((n_0 + n)^m n_{thc}^{-m} - 1)} dn, \quad (20)$$

де  $n_* = 2h_0 \beta^{-1} A_a^{-1} (l_* - l_0)$ ,  $n_0 = 2h_0 \beta^{-1} A_a^{-1} l_0$ . Таким чином, знаючи характеристики  $m, A_{2t}, \beta, n_{thc}, A_a$ , період  $t = t_*$  оцінюють за формулою (20).

Для технічної діагностики важливо визначити через параметри сигналів АЕ (середнє значення амплітуди  $A_a$  й інтенсивності  $\dot{n}$  сигналів АЕ) розміри дефектів, які розвиваються. Зокрема, необхідно оцінити довжину підростання прямолінійних тріщин у тонкостінних елементах конструкцій. Для цього діємо так, як і в задачі Сакка.

Для спрощення розв'язку задачі беремо такі значення зовнішнього навантаження  $p$ , щоб рівняння (6) подати наближено співвідношенням (12). Тепер швидкість росту тріщини низькотемпературної повзучості

$$V = \beta A_a h_0^{-1} \dot{n}. \quad (21)$$

Підставляючи вираз (21) у рівняння (12), отримаємо вираз

$$\beta A_a h_0^{-1} \dot{n} \approx A_{2t} K_{CC}^{-2m} (\pi p^2 l)^m, \quad (22)$$

з якого знайдемо довжину тріщини:

$$l = \pi^{-2} p^{-2} K_{CC}^2 \sqrt[m]{B_1 \dot{n}}. \quad (23)$$

Тут  $B_1$  – константа, яку визначаємо через характеристики матеріалу:

$$B_1 = \beta A_a A_{2t}^{-1} h_0^{-1}. \quad (24)$$

Таким чином, якщо відомі характеристики матеріалу  $B_1, m, K_{CC}$  і експериментально знайдена інтенсивність  $\dot{n}$  сигналів АЕ за однорідного навантаження  $p$ , то довжину  $l$  утвореної в пластині прямолінійної тріщини можна наближено визначити за формулою (23), якщо відсутні інші джерела АЕ.

**Чистий згин балки з бічною тріщиною.** Під час досліджень росту тріщин низькотемпературної повзучості, зокрема для побудови кінетичних діаграм  $V-K_I$ , застосовують [5] силову схему довготривалого чистого згину балкового зразка з бічною тріщиною (рис. 4). Але досягнути тут нижнього порогового значення КІН  $K_{thc}$  стандартними методиками не вдається. Спробуємо побудувати методику, яка ґрунтується на залежності швидкості росту тріщини низькотемпературної повзучості від параметрів сигналів АЕ, що виникають під час сповільненого руйнування, і КІН. Суть її ось у чому.

Розглянемо схему чистого згину балкового зразка поперечного перерізу  $h_0 \times h_1$  з бічною тріщиною початкової довжини  $l_0$  (рис. 4). Вважаємо, що зразок підданий довготривалому згину моментами  $M$ . Необхідно визначити період  $t = t_*$  навантаження зразка, після якого тріщина низькотемпературної повзучості підросе до критичної довжини  $l = l_*$  і балка зруйнується.

Розв'язок цієї задачі через довжину тріщини  $l$  можна знайти за математичною моделлю (6):

$$\frac{dS}{dt} = \frac{A_{2l} h_1 K_{CC}^{-2m} (K_1^{2m}(S) - K_{thc}^{2m})}{1 - K_{CC}^{-2} K_1^2(S)}, \quad (25)$$

$$t = 0, \quad S(0) = S_0; \quad t = t_*, \quad S(t_*) = S_*; \quad K_1(S_*) = K_{CC}.$$

Тут  $S_0 = l_0 h_1$ ,  $S_* = h_1 l_*$ , а КІН  $K_1(S)$  визначає формула [10]

$$K_1(S) = (6M / h_1 h^{1.5}) \sqrt{\varepsilon} (1,99 - 2,47\varepsilon + 12,97\varepsilon^2 - 23,17\varepsilon^3 + 24,81\varepsilon^4 + o(\varepsilon^{16})),$$

$$(\varepsilon = S / h_0 h_1). \quad (26)$$

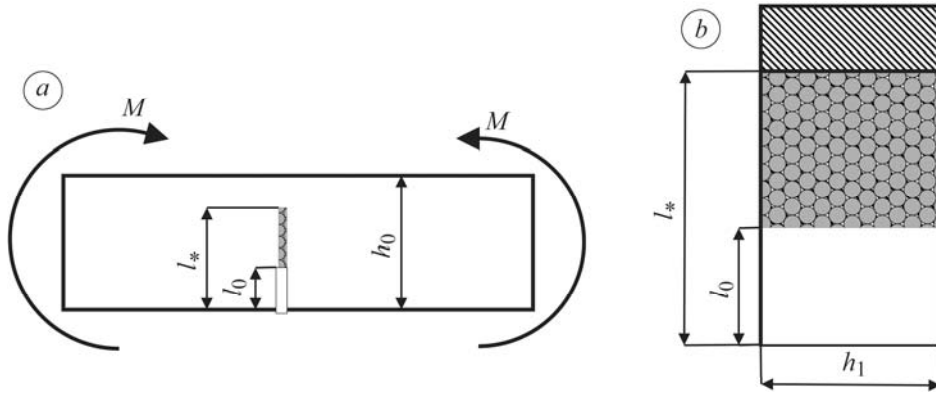


Рис. 4. Схема навантаження балки з поверхневою тріщиною чистим згином (а) та її переріз у площині тріщини (b): прямокутник з кружечками – поверхня докритичного росту тріщини.

Fig. 4. Loading of the beam with a surface crack under pure bending (a) and its cross-section in the crack location plane (b): rectangles with a circular hatching – surface of subcritical crack growth (schematically).

Запишемо тепер математичну модель (25) через параметри сигналів АЕ:

$$\frac{dS}{dt} = \beta A_a \frac{dn}{dt}, \quad \varepsilon = \frac{\beta A_a n}{h_0 h_1}, \quad K_1(S) = K_1(\beta A_a n) = K_{In}(n). \quad (27)$$

Тоді

$$\frac{dn}{dt} = \frac{A_{2l} h_1 K_{CC}^{-2m} (K_{In}^{2m}(n) - K_{thc}^{2m})}{\beta A_a [1 - K_{CC}^{-2} K_{In}^2(n)]}, \quad (28)$$

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

Проінтегрувавши вираз (28), коли задані початкова і кінцева умови, для визначення періоду  $t = t_*$  докритичного росту в балковому зразку тріщини низькотемпературної повзучості отримаємо:

$$t_* = \int_0^{n_*} \frac{\beta A_a K_{CC}^{2m} [1 - K_{CC}^{-2} K_{In}^2(n)]}{A_{2l} h_1 [K_{In}^{2m}(n) - K_{thc}^{2m}]} dn. \quad (29)$$

Щоб знайти час  $t_*$  за формулою (29), необхідно знати параметри  $m$ ,  $A_{2l}$ ,  $\beta$ ,  $A_a$ ,  $n_*$ ,  $K_{thc}$ ,  $K_{CC}$ . Значення  $n_*$  обчислюємо зі співвідношення, яке аналогічне (5). Інші величини знаходимо так. Запишемо формулу (28) у вигляді

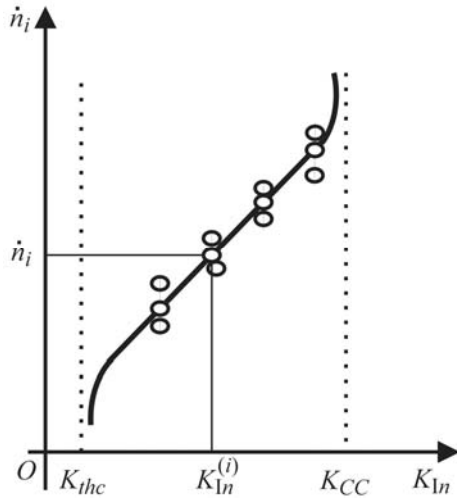


Рис. 5. Кінетична діаграма залежності інтенсивності сигналів акустичної емісії  $\dot{n}$  від коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{In}$ .

Fig. 5. Kinetic diagram of the dependence of the intensity of acoustic emission signals  $\dot{n}$  on stress intensity factor  $K_{In}$ .

$$\dot{n} = \frac{B_3(K_{In}^{2m}(n) - K_{thc}^{2m})}{1 - K_{CC}^{-2}K_{In}^2(n)}, \quad (30)$$

де  $B_3 = \frac{A_{2t}h_1K_{CC}^{-2m}}{\beta A_a}$ . Далі за силовою

схемою згину балкового зразка з бічною тріщиною (рис. 4) виконуємо експериментальні дослідження і будемо залежність інтенсивності  $\dot{n}$  сигналів АЕ від КІН  $K_{In}$ . При цьому, використовуючи формули (25), (27) і змінюючи момент  $M$  та довжину тріщини  $l$ , задаємо значення КІН  $K_{In}^{(i)}$  у межах  $K_{thc} < K_{In}^{(i)} < K_{CC}$ . Для цих значень згідно з експериментальною методикою [4] визначаємо інтенсивність сигналів  $\dot{n}_i$ . Необхідно зробити не менше чотирьох замірів для різних значень  $K_{In}^{(i)}$  і не менше трьох  $\dot{n}_i$  для кожного  $K_{In}^{(i)}$  (рис. 5). За формулою

(28) методом найменших квадратів [11] знаходимо характеристики  $B_3$ ,  $K_{thc}$ ,  $K_{CC}$ . Підставивши їх у співвідношення (28), отримаємо кінетичну діаграму  $\dot{n}-K_{In}$  (КІН під час поширення тріщини низькотемпературної повзучості).

За такими кінетичними діаграмами можна визначити періоди докритичного росту тріщин низькотемпературної повзучості через параметри сигналів АЕ. Для знаходження періоду  $t = t_*$  докритичного росту тріщин низькотемпературної повзучості важливі також кінетичні діаграми  $V-K_I$  [5]. Проте пряма їх побудова без застосування методу АЕ складна і пов'язана з довготривалим експериментом. Тому пропонуємо спочатку побудувати менш трудомісткі кінетичні діаграми  $\dot{n}-K_{In}$ , а потім за допомогою відповідного аналітичного перетворення перейти до діаграми  $V-K_I$ . Для цього використаємо формулу (21), яка пов'язує величини  $V$  і  $\dot{n}$ :

$$V = B_4 h_1^{-1} \dot{n}. \quad (31)$$

Константу  $B_4$  визначаємо так. За деяких високих значень  $K_{In}^{(i)} < K_{CC}$  швидкість  $V$  росту тріщини низькотемпературної повзучості буде значною і на величину  $\Delta_i l$  вона підросте за невеликі проміжки часу  $\Delta_i t$ . Для цих же значень  $K_{In}^{(i)}$  знаходимо:

$$B_4 = k^{-1} h_1 \sum_{i=1}^k (\dot{n}_i)^{-1} \Delta_i l (\Delta_i t)^{-1}. \quad (32)$$

У формулі (32)  $k \geq 3$ . Тобто потрібно викликати не менше ніж трьох підростань тріщини низькотемпературної повзучості із замірами  $\Delta_i l$ ,  $\Delta_i t$ ,  $\dot{n}_i$ . Таким чином, за допомогою формул (31) і (32) кінетичну діаграму  $\dot{n}-K_{In}$  можна перетворити в кінетичну діаграму  $V-K_I$ .



## ВИСНОВКИ

Розроблено теоретичні основи підходу для визначення періоду докритичного росту тріщини низькотемпературної повзучості за параметрами сигналів акустичної емісії. Його застосування проілюстровано на задачах Гріффітса і Сакка. На основі підходу розроблено алгоритм побудови кінетичних діаграм росту тріщин низькотемпературної повзучості методом акустичної емісії.

*РЕЗЮМЕ.* Определен период докритического роста трещин низкотемпературной ползучести по параметрам сигналов акустической эмиссии. Разработан способ построения кинетических диаграмм роста таких трещин с помощью метода акустической эмиссии.

*SUMMARY.* The period of subcritical growth of low-temperature creep cracks is evaluated by the parameters of acoustic emission signals. The method of construction of kinetic diagrams of such crack growth using the method of acoustic emission is developed.

1. *Андрейків А. Е., Лысак Н. В.* Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. – К.: Наук. думка, 1980. – 176 с.
2. *Скальський В. Р., Андрейків О. Є.* Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії. – Львів: Вид. центр ЛНУ ім. Ів. Франка, 2006. – 330 с.
3. *Андрейків О. Є., Скальський В. Р., Сулим Г. Т.* Теоретичні основи методу акустичної емісії в механіці руйнування. – Львів: Сполом, 2007. – 480 с.
4. *Назарчук З. Т., Скальський В. Р.* Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: у 3-х т. – К.: Наук. думка, 2009.
5. *Скальський В. Р., Матвіїв Ю. Я., Крадінова Т. А.* Методика оцінки характеристик повзучості матеріалів // *Машинознавство.* – 2012. – № 1. – С. 27–32.
6. *Довговічність пластин з тріщинами за довготривалого статичного навантаження і локальної повзучості / О. Є. Андрейків, В. Р. Скальський, Ю. Я. Матвіїв, Т. А. Крадінова // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2012. – **48**, № 1. – С. 39–46.  
(*Andreykiv O. E., Skal's'kyi V. R., Matviiv Yu. Ya., and Kradinova T. A.* Evaluation of the Durability of Cracked plates under the conditions of long-term static loading and local creep // *Materials Science.* – 2012. – **48**, № 1. – P. 36–45.)
7. *Analysis of acoustic emission caused by internal crack / О. Ye. Andreykiv, M. V. Lysak, O. M. Serhienko, V. R. Skalsky // Engng. Fract. Mech.* – 2001. – **68**, № 7. – P. 1317–1333.
8. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б.* Докритичний ріст плоскої тріщини в тривимірному тілі за високотемпературної повзучості // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2008. – **44**, № 2. – С. 19–26.  
(*Andreykiv 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.)
9. *Андрейків А. Е.* Пространственные задачи теории трещин. – К.: Наук. думка, 1982. – 348 с.
10. *Stress intensity factors handbook / Ed.: Y. Murakami.* – Pergamon Books LTD, 1987. – Vol. 1, 2.
11. *Сквайрс Дж.* Практическая физика. – М.: Мир, 1971. – 246 с.

Одержано 29.03.2013