

УДК 534-16

Ю.Я. Матвіїв, І.Я. Долінська, Л.Н. Добровольська
Луцький національний технічний університет**АКУСТИКО-ЕМІСІЙНА ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЕЛЕМЕНТІВ
КОНСТРУКЦІЙ З ПОВЕРХНЕВИМИ ТРІЩИНАМИ ЗА ДОВГОТРИВАЛОГО
СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

Запропоновано методику оцінки за параметрами акустичної емісії ресурсу елементів конструкцій з поверхневими тріщинами при довготривалому статичному розтязі. При цьому розглянуто випадок розтягу пластини з поверхневою тріщиною.

Ключові слова: *низькотемпературна повзучість, метод акустичної емісії, період докритичного росту тріщини.*

Вступ. Проблеми інженерної практики, особливо при розвитку теплової і атомної енергетики, хімічної і нафтохімічної промисловості, а також інших областей сучасної техніки, де використовуються елементи конструкцій довготривалої експлуатації за довготривалого статичного навантаження вимагає від дослідників більш надійних методів прогнозування довговічності таких елементів, особливо з тріщинами. Тут постає питання про розвиток таких дефектів, їх кінетику і, взагалі, про період їх докритичного росту. Дослідити цю проблему суто емпірично, шляхом експериментальних досліджень, технічно досить складно і не завжди в принципі можливо. Виникає необхідність в створенні надійної теорії протікання і розрахунку цих процесів.

Відомі на даний час дослідження [1–6] довговічності елементів конструкцій з тріщинами під дією довготривалого статичного навантаження в переважній більшості відносяться до випадків, коли залишкову довговічність таких елементів знаходять за допомогою кінетичних діаграм поширення тріщин повзучості (залежність швидкості від коефіцієнта інтенсивності напружень). Побудова таких діаграм пов'язана з великими часовими періодами дослідів, а побудова першої її ділянки взагалі практично утруднена. Тому тут пропонується інший підхід. Це пов'язане з наступним.

Поширення тріщин за довготривалого статичного навантаження відноситься до одного з видів сповільненого руйнування. Оскільки таке руйнування реалізується шляхом утворення або об'єднання дефектів (вакансій, дислокацій, пор, мікротріщин, макротріщин і т.д.), що спричиняє генерування пружних хвиль, то найефективнішим методом діагностування сповільненого руйнування елементів конструкцій за такого навантаження є метод акустичної емісії [7–11]. Для виявлення такого руйнування елементів конструкцій метод акустичної емісії застосовується давно [7–11], але це була лише якісна оцінка такого процесу, тобто його зародження чи протікання. Для його кількісної оцінки необхідно встановити залежності параметрів акустичної емісії від параметрів сповільненого руйнування матеріалу.

У даній роботі зроблено спробу побудови таких залежностей для випадку поширення поверхневих тріщин низькотемпературної повзучості в конструкційних матеріалах і на цій основі реалізація кількісної діагностики такого процесу за параметрами акустичної емісії, які відносно легко можуть бути встановлені з допомогою існуючих методик [7–11].

Постановка задачі. Розглянемо тривимірне тіло, яке послаблене плоскою поверхневою макротріщиною S_T з гладким випуклим контуром L_T і в нескінченно віддалених точках розтягується рівномірно розподіленими довготривалими зусиллями інтенсивності p , направленими перпендикулярно до площини розміщення тріщини (рис. 1).

Вважатимемо, що таке тіло піддане дії однорідного низькотемпературного поля, яке в зоні передруйнування біля контуру тріщини викликає низькотемпературну повзучість, що спричиняє поширення тріщини. Задача полягає у визначенні такого часу $t = t_*$, по досягненню якого розмір площі S тріщини низькотемпературної повзучості досягне критичного значення $S = S_*$ і тіло зруйнується.

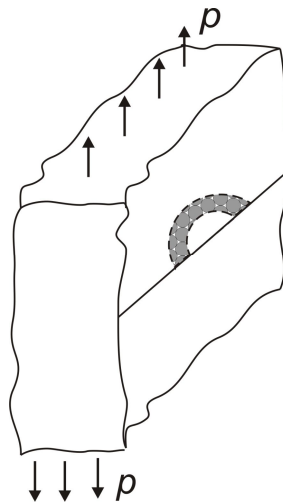


Рис. 1. Схема навантаження тіла з поверхневою тріщиною

На основі результатів роботи [5] розв'язок такої задачі зводиться до наступного диференціального рівняння

$$\frac{dS}{dt} = \frac{A_{2t}}{K_{CC}^{2m} L_T} \int [K_I^{2m}(\xi) - K_{thc}^{2m}] d\xi [1 - K_{CC}^{-2} L_T^{-1} \int K_I^2(\xi) d\xi]^{-1} \quad (1)$$

за початкової і кінцевої умов

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

Як впливає із вище приведеного, при дослідженні залишкового ресурсу елементів конструкцій за довготривалого статичного навантаження важливим є встановлення розмірів вихідних дефектів S_T , параметрів кінетичних діаграм поширення тріщин низькотемпературної повзучості (величини $m, A_{2t}, K_{CC}, K_{thc}$ в рівнянні (1)) і при допомозі математичної моделі (1), (2) визначення залишкового ресурсу (періоду докритичного росту тріщини низькотемпературної повзучості) $t = t_*$. Проте, визначення вихідних розмірів дефектів і параметрів $m, A_{2t}, K_{CC}, K_{thc}$, які повинні бути знайдені для уже експлуатованого матеріалу досліджуваного елемента конструкції, пов'язане із значними технічними труднощами [5]. Тому в даній роботі зроблено спробу побудувати розрахункову модель оцінки залишкового ресурсу (періоду докритичного росту тріщин низькотемпературної повзучості) елементів конструкцій за довготривалого статичного навантаження через параметри сигналів акустичної емісії (АЕ), які вимірюються безпосередньо на поверхні досліджуваного елемента під навантаженням. Суть цієї моделі полягає у наступному.

Як відомо [8], площу S новоутворених дефектів (площу підростання тріщини) можна визначити через суму амплітуд A_i сигналів АЕ так

$$S = v \sum_{i=1}^n A_i. \quad (3)$$

Тут v – акустико-емісійна константа матеріалу, яка визначається із експерименту [10]; n – кількість сигналів АЕ (кожен сигнал вважатимемо відтворенням одиничної події акту руйнування матеріалу), зареєстрованих у процесі поширення тріщини.

У праці [3] показано, що зміна площі S плоскої тріщини повзучості незначно залежить від конфігурації її контуру за однорідного розтягу, який під час поширення прямує до колового (поверхневі до півкологового). Тому в розглядуваному випадку критичний розмір площі тріщини S_* буде визначатися з врахуванням критерію Ірвіна [13] так

$$S_* \approx \frac{\rho^3 K_{CC}^4}{32\rho^4}. \quad (4)$$

Тоді на основі формул (3) і (4) можна записати рівняння для визначення кількості n сигналів АЕ, що буде випромінювати тріщина при своєму докритичному рості

$$v \sum_{i=1}^n A_i = \frac{\rho^3 K_{CC}^4}{32\rho^4} - S_T. \quad (5)$$

Як впливає з результатів праці [3], стрибки підростання тріщини вздовж її контуру за низькотемпературної повзучості для мікроізотропного матеріалу можна приймати наближено однаковими за різних інкубаційних періодів їх підготовки. Тому вважаємо, що площі s_i мікроруйнування, які генерують кожну подію АЕ, будуть в середньому однакові (приймаємо їх мікрокруговими рис. 2; $s_i \approx \text{const} = s_a$).

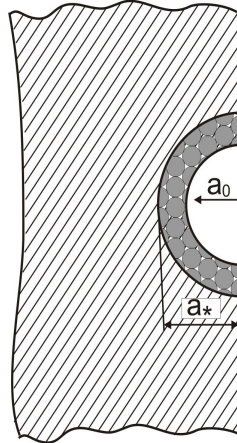


Рис. 2. Схема січення тіла по площині розміщення поверхневої тріщини початкового розміру a_0 і кінцевого a_* : світла область - початкова тріщина; півкільце – площа докритичного росту тріщини; маленькі кружки в півкільці – площі мікроруйнувань, які генерують сигнали АЕ

Для реальних матеріалів, в яких локальні параметри структури, площі мікроруйнувань і, відповідно, амплітуди сигналів АЕ значно відрізняються, таке припущення здавалося б є некоректним. Проте в матеріалознавстві [14] є виправданим введення поняття розміру зерна (середнє значення розміру зерен на визначеній площі поверхні матеріалу). У зв'язку з цим для спрощення розв'язку задач технічної діагностики ми також вводимо усереднений розмір s_a площі мікроруйнувань і амплітуди A_a сигналів АЕ, що його супроводжує, тобто

$$A_i \approx \text{const} = A_a, \quad S(t) = s_a n(t) = v \sum_{i=1}^n A_i \approx v A_a n(t). \quad (6)$$

На основі співвідношень (4)–(6) знайдемо критичне значення $n = n_*$ кількості сигналів АЕ, після якого відбудеться спонтанне поширення тріщини

$$n_* = \frac{1}{A_a v} \cdot \frac{\rho^3 K_{CC}^4 - S_T}{32\rho^4}. \quad (7)$$

Пластина з поверхневою тріщиною. Для багатьох тонкостінних елементів конструкцій (ємності високого тиску, паропроводи, нафтогазопроводи і т.д.) залишкову довговічність визначає період докритичного росту поверхневої тріщини. Оскільки товщини таких елементів конструкцій і параметри поверхневих тріщин набагато менші від інших геометричних розмірів, то кінетика поширення в них поверхневих тріщин буде приблизно така ж, як і в нескінченній пластині такої ж товщини. З цією метою розглянемо задачу про визначення періоду докритичного росту поверхневої тріщини в пластині, суть якої полягає в наступному.

Розглянемо нескінченну пластину товщиною h_0 з поверхневою тріщиною, яка розтягується в нескінченно віддалених точках довготривалими рівномірно розподіленими зусиллями інтенсивності ρ , які направлені перпендикулярно до площини розміщення тріщини (рис. 3). Пластина піддана дії рівномірно розподіленого температурного поля, що викликає в зоні передруйнування біля контуру тріщини явище низькотемпературної повзучості. Задача полягає у визначенні такого часу $t = t_*$, за який тріщина низькотемпературної повзучості досягне протилежної поверхні пластины і ємність, яку моделює пластина з тріщиною, розгерметизується.

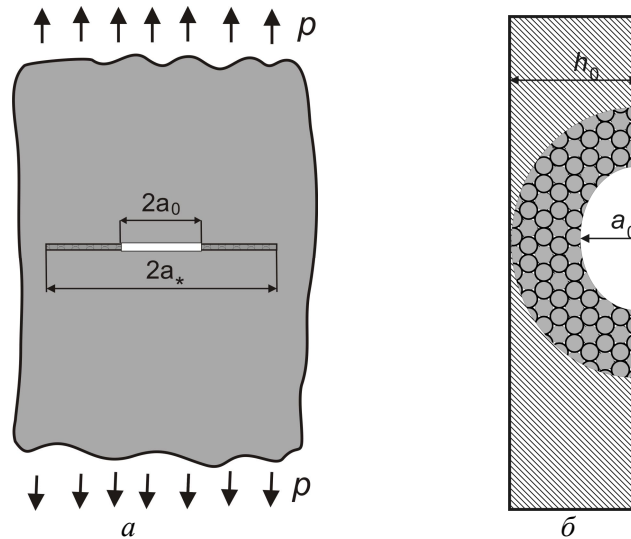


Рис. 3. Схема навантаження пластини з поверхневою тріщиною (а); б – січення пластини по площині розміщення тріщини : світле півколо – площа вихідної тріщини, півкільце – площа докритичного росту тріщини

Розв’язок такої задачі через параметри сигналів АЕ здійснюємо аналогічно попередньому. Як впливає із відомого [3] методу еквівалентних площ, швидкість зміни площі S тріщини повзучості за однорідного розтягу пластини незначно залежить від конфігурації контуру тріщини (у даному випадку поверхневої). У зв’язку з цим конфігурацію контуру тріщини замінюємо півколовою з вихідною площею, що рівна вихідній площі досліджуваного дефекту $S = S_0$. Коефіцієнт інтенсивності напружень $K_I(0)$, який входить в рівняння (1), змінюється вздовж півколового контуру тріщини, що значно ускладнює задачу. Тому з невеликою похибкою, яка піде в запас залишкової довговічності пластини, величину $K_I(S)$ вибираємо постійною вздовж контуру тріщини і рівною його максимальному значенню. Тоді математична модель (1), (2) зведеться до виду

$$\frac{dS}{dt} = \frac{A_{2t} \sqrt{2pS} K_{CC}^{-2m} [K_I^{2m}(S) - K_{thc}^{2m}]}{1 - K_{CC}^{-2} K_I^2(S)}, \quad (8)$$

$$t = 0, S(0) = S_0; t = t_*, S(t_*) = 0,5p h_0^2,$$

або через швидкість V росту тріщини

$$V = \frac{da}{dt} = \frac{A_{2t} K_{CC}^{-2m} [K_I^{2m} - K_{thc}^{2m}]}{1 - K_I^2 K_{CC}^{-2}}, \quad (9)$$

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

Тут a, a_0, a_* – радіуси контурів біжучої, вихідної і критичної тріщин. Співвідношення (9) описує кінетичну діаграму росту тріщини низькотемпературної повзучості.

Значення $K_I(S)$ знаходимо на основі результатів праці [15] в такому вигляді

$$K_I(S) = 0,7p \sqrt{p h_0 e} (1 + 0,32e^2) (1,04 + 0,23e^2 - 0,11e^4); e = a/h_0 = \sqrt{2S/p h_0^2}, \quad (10)$$

або

$$K_I(S) = 0,7p^4 \sqrt{2pS} (1 + 0,64p^{-1} h_0^{-2} S) (1,04 + 0,46p^{-1} h_0^{-2} S - 0,44p^{-2} h_0^{-4} S^2). \quad (11)$$

Використовуючи співвідношення (6), математичну модель (8) для визначення періоду $t = t_*$ докритичного росту тріщини низькотемпературної повзучості запишемо через параметри сигналів АЕ в такому вигляді

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\sqrt{2p n A_{2t}} \zeta^{2m}(n) [1 - \zeta^{-2m}(n) \zeta^{2m}(n_{thc})]}{\zeta^{2m}(n) \sqrt{B A_a} [1 - \zeta^2(n) \zeta^{-2}(n_*)]}, \quad (12)$$

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

Тут

$$n_* = 0,5 p v^{-1} A_a^{-1} h_0^2,$$

$$\zeta(n) = \sqrt[4]{n(1 + 0,64 p^{-1} h_0^2 v A_a n)(1,04 + 0,46 p^{-1} h_0^2 v A_a n - 0,44 p^{-2} h_0^4 v^2 A_a^2 n^2)}.$$

Для визначення періоду $t = t_*$ докритичного росту в нескінченній пластині поверхневої півкругової тріщини низькотемпературної повзучості проінтегруємо рівняння (12) за заданій початковій і кінцевій умов і отримаємо залежність

$$t_* = \int_0^{n_*} \frac{\zeta^{2m}(n) \sqrt{B A_a} [1 - \zeta^2(n) \zeta^{-2}(n_*)]}{\sqrt{2p n A_{2t}} \zeta^{2m}(n) [1 - \zeta^{-2m}(n) \zeta^{2m}(n_{thc})]} dn \quad (13)$$

Отже, якщо знайдено з експерименту характеристики $m, A_{2t}, v, n_{thc}, A_a$, то період $t = t_*$ докритичного росту в пластині тріщини низькотемпературної повзучості оцінюється формулою (13).

Поряд із отриманими вище результатами для інженерної практики, зокрема для технічної діагностики, важливе значення має визначення за параметрами сигналів АЕ розмірів дефектів, особливо площі тріщин, які утворюються. Отримані вище результати дають можливість розробити ефективний підхід, суть якого полягає в наступному.

Як було зазначено вище, співвідношення (9) аналітично описує кінетичну діаграму росту тріщини низькотемпературної повзучості, яка представляє собою в координатах $V \sim K_I, S$ – подібну криву з нижнім K_{thc} і верхнім K_{CC} пороговими значеннями. Середня частина цієї діаграми в логарифмічних координатах $\lg V \sim \lg K_I$, де $K_{thc} \ll K_I \ll K_{CC}$ буде майже прямолінійна. Для цієї ділянки співвідношення (9) наближено набуде такого вигляду

$$V \approx A_{2t} K_I^{2m} K_{CC}^{-2m} (K_{thc} \ll K_I \ll K_{CC}), \quad (14)$$

що нагадує формулу Паріса, яка описує також прямолінійну ділянку, але діаграми втомного руйнування матеріалів [14].

Далі для визначення величини швидкості V росту тріщини низькотемпературної повзучості на основі співвідношення (6) можемо записати наступну формулу

$$V = v A_a (2p S)^{0,5} \dot{n}, \quad (15)$$

де $\dot{n} = dn/dt$ – інтенсивність сигналів (кількість сигналів за одиницю часу).

Підставляючи (15) в (14), отримаємо

$$v A_a \dot{n} \approx A_{2t} \sqrt{2p S} K_{CC}^{-2m} K_I^{2m}(S). \quad (16)$$

Тут величина $K_I(S)$ визначається за формулою (11). Підставляючи (11) у (16), для визначення площі S поверхневої тріщини через механічні характеристики матеріалу і параметри сигналів АЕ отримаємо рівняння

$$v A_a \dot{n} K_{CC}^{2m} A_{2t}^{-1} \approx \sqrt{2p S} [0,7 p^4 \sqrt{2p S} (1 + 0,64 p^{-1} h_0^2 S) (1,04 + 0,46 p^{-1} h_0^2 S - 0,44 p^{-2} h_0^4 S^2)]^{2m}. \quad (17)$$

Якщо площа S поверхневої тріщини мала, що виконується умова $S \ll S_*$, то рівняння (16) спроститься до вигляду

$$v A_a \dot{n} K_{CC}^{2m} A_{2t}^{-1} \approx p^{2m} (2p S)^{0,5(m+1)}. \quad (18)$$

З рівняння (18) знайдемо наближено площу S тріщини у такому вигляді

$$S \approx (2p)^{-1,5(m+1)} \sqrt[3]{B v A_a \dot{n}}. \quad (19)$$

Тут B – константа, яка визначається через характеристики матеріалу і навантаження так

$$B = K_{CC}^{2m} p^{-2m} A_{2t}^{-1}. \quad (20)$$

Отже, якщо відомі характеристики матеріалу B і експериментально знайдено параметри сигналів АЕ v, A_a, \dot{n} за однорідного навантаження p , то площу наявної в пластині

поверхневої тріщини S можна наближено визначити формулою (19) за умови відсутності інших джерел сигналів АЕ.

Висновки. Розроблено методику для визначення за параметрами сигналів акустичної емісії періоду докритичного росту поверхневих тріщин низькотемпературної повзучості в елементах конструкцій під дією довготривалого статичного навантаження. Застосування даної методики продемонстровано на задачі про визначення залишкового ресурсу пластини з поверхневою тріщиною, а також початкового розміру тріщини.

1. Каминский А.А. Механика разрушения вязкоупругих тел / А.А. Каминский. – К.: Наук. думка, 1980. – 157 с.
2. Андрейків О.Є. Механіка руйнування металічних пластин при високотемпературній повзучості / О.Є. Андрейків, Н.Б. Сас // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – № 2. – С. 62–68.
3. Андрейків О.Є. Докритичний ріст плоскої тріщини в тривимірному тілі за високотемпературної повзучості / О.Є. Андрейків, Н.Б. Сас // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2008. – № 2. – С. 19-26.
4. Андрейків О.Є. Математична модель для визначення періоду докритичного поширення тріщин високотемпературної повзучості в твердих тілах / О.Є. Андрейків, Н.Б. Сас // Доповіді НАН України. – Київ. – 2006. – № 5. – С. 47-52.
5. Визначення залишкової довговічності тривимірних тіл з тріщинами за довготривалого статичного навантаження і низькотемпературного поля / О. Андрейків, В. Скальський, Ю. Матвій, Т. Крадінова // Машинознавство. – 2011. – № 5-6 (167-168). – С. 35-39.
6. Довговічність пластин з тріщинами за довготривалого статичного навантаження / О.Є. Андрейків, В. Р. Скальський, Ю.Я. Матвій, Т.А. Крадінова // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2012. – № 1. – С. 39-46.
7. Андрейкив. А.Е. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения / А.Е. Андрейкив, Н.В. Лысак. – К.: Наук. Думка, 1980. – 176 с.
8. Скальський В.Р. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії / В.Р. Скальський, О.Є. Андрейків. – Л.: Видавн. центр ЛНУ ім. Ів. Франка, 2006. – 330 с.
9. Андрейків О.Є. Теоретичні основи методу акустичної емісії в механіці руйнування / О.Є. Андрейків, В.Р. Скальський, Г.Т. Сулим. – Львів: СПОЛОМ, 2007. – 480 с.
10. Назарчук З.Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: науково-технічний посібник: у 3 т. / З.Т. Назарчук, В.Р. Скальський. – К.: Наук. думка, 2009. – 877 с.
11. Analysis of acoustic emission caused by internal crack / O. Ye. Andreykiv, M. V. Lysak, O. M. Serhienko, V. R. Skalsky // Eng. Fract. Mech. – 2001. Issue 11. – 68, № 7. – P. 1317–1333.
12. Скальський В.Р. Методика оцінки характеристик повзучості матеріалів / В.Р. Скальський, Ю.Я. Матвій, Т.А. Крадінова // Машинознавство. – 2012. – № 1. – С. 27-32.
13. Панасюк В. В. Основы механики разрушения / В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, В.З. Партон. – К.: Наукова думка, 1988. – 488 с.
14. Металознавство / О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.Н. Москаленко. – К.: ІВЦ, видавництво «Політехніка», 2002. – 384 с.
15. Stress intensity factors handbook / Editor in chief Y. Murakami. – Pergamon Books LTD, 1987 – V. 1,2. – 1016 p.