

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З КОРОТКИМИ ТРІЩИНАМИ

О.Є. Андрейків*, Ю.М. Лапушта**, Н.С. Яджак*

*Львівський національний університет імені Івана Франка, Україна

**Університет Клермон-Овернь, Національний центр наукових досліджень Франції, Франція

Abstract. The method for residual resource determination of thin-walled structural elements for variable load has been presented in the paper. The initial cracks are considered to be physically short, and a construction element is subject to cyclic loading. The method is based on the mathematical model for investigation of short fatigue crack growth using the deformation parameters. The application of the proposed method is verified on example of residual resource determination of a strip with two stress risers.

Майже всі елементи конструкцій при довготривалій експлуатації мають дефекти типу тріщин. Здебільшого елементи конструкцій з великими тріщинами підлягають ремонту або заміні. Проблема полягає у визначенні залишкового ресурсу елементів довготривалої експлуатації з короткими тріщинами, за якого експлуатація конструкційного елемента може бути безпечною.

Проблема коротких тріщин і визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій з такими тріщинами в літературі розглядається давно [1, 2]. При цьому короткі тріщини поділяють на два класи: механічно короткі та фізично короткі. Для механічно коротких тріщин розроблено достатньо розрахункових моделей та методів для дослідження їх докритичного росту.

У цій роботі запропоновано розрахункову модель для визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій з фізично короткими тріщинами, тобто тріщинами, розмір яких співмірний з розміром структурного елемента або рівний нулеві. Суть запропонованої моделі полягає в наступному.

Розглянемо пластину, піддану дії циклічного навантаження амплітудою P (рис.1). У пластині є боковий концентратор напружень радіуса r , з вершини якого виходить тріщина початкової довжини l_0 . Оскільки тріщина розташована у пластичній зоні біля вершини концентратора, її можна вважати короткою. Задача полягає у визначенні періоду докритичного росту тріщини.

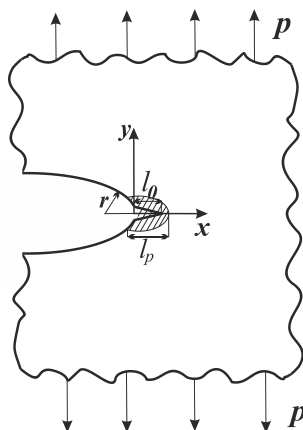


Рис. 1. Пластина з боковим концентратором напружень та тріщиною

На початкову довжину тріщини l_0 не накладено жодних обмежень: початкова тріщина може бути макротріщиною, фізично короткою, механічно короткою або навіть нульовою. У зв'язку з цим для побудови моделі не можна використовувати ні

розкриття у вершині тріщини δ , ні коефіцієнт інтенсивності напружень K_I , адже ці параметри дорівнюватимуть нулеві. Тому математичну модель слід будувати в параметрах деформації ε .

Спершу запишемо рівняння швидкості поширення механічно короткої тріщини [3]

$$\frac{dl}{dN} = \frac{\alpha[(\delta_{t\max} - \delta_{t\min})^2 - (\delta_{th\max} - \delta_{th\min})^2]}{\sigma_t \delta_{fc} - \sigma_t \delta_{t\max}}, \quad (1)$$

де l – довжина тріщини; N – кількість циклів; α – характеристика корозійно-втомного руйнування, яку визначають із експерименту; σ_t – середнє напруження в зоні передруйнування; δ_{fc} – критичне значення розкриття δ_{\max} , яке відповідає спонтанному руйнуванню матеріалу, δ – розкриття вершини тріщини.

Застосувавши до рівняння (1) еквівалентність відношень максимальної та критичної деформації й відповідних показників розкриття вершини тріщини [5]

$$\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{fc}} = \frac{\delta_{\max}}{\delta_{fc}}, \quad (2)$$

отримаємо рівняння в параметрах деформації:

$$\frac{dl}{dN} = \alpha(1-R)^2 \frac{\delta_{fc}}{\varepsilon_{fc}} \cdot \frac{\varepsilon_{\max}^2 - \varepsilon_{th}^2}{\varepsilon_{fc} - \varepsilon_{\max}}. \quad (3)$$

Тут R – коефіцієнт асиметрії циклу; ε_{th} – нижнє порогове значення деформації; ε_{fc} – критичне значення деформації ε_{\max} , яке відповідає спонтанному руйнуванню матеріалу; У рівнянні (3) невідому величину максимальної деформації розтягу ε_{\max} обчислимо за формулою [5]:

$$\varepsilon_{\max} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_{fc} K_{I\max}^2 l + \varepsilon_0 K_{fc}^2 (l_p - l)}{K_{fc}^2 l_p}, & l < l_p; \\ \frac{K_{I\max}^2}{K_{fc}^2} \varepsilon_{fc}, & l \geq l_p. \end{cases} \quad (4)$$

де $\nu = 2$ – параметр інтерполяції; $K_{I\max}$ – максимальний коефіцієнт інтенсивності напружень циклу; K_{fc} – пороговий коефіцієнт інтенсивності напружень циклу; l_p – глибина пластичної зони (області передруйнування); ε_0 – максимальна величина деформації біля концентратора в початковому стані (за відсутності тріщини) [4], яка визначається так:

$$\varepsilon_0 = \left[1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^\nu \right]^{-\frac{1}{\nu}} \left(\frac{K_I}{K_{fc}} \right)^2 \varepsilon_{fc}, \quad (5)$$

тут K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень за нормального відриву; r – радіус заокруглення вершини надрізів пластини;

$$r_0 = \frac{4K_{fc}^2}{\pi E \sigma_t \varepsilon_{fc}}. \quad (6)$$

Таким чином, максимальна деформація не набуває нульового значення навіть при відсутності початкової тріщини.

Застосувавши формули (4) – (6) до рівняння (3), отримаємо рівняння для знаходження швидкості поширення втомної тріщини:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{\alpha \delta_{fc} (1-R)^2}{\varepsilon_{fc}^2 K_{fc}^2 l_p} \cdot \frac{\left[\varepsilon_{fc} K_{I_{max}}^2 l + K_I^2 \varepsilon_{fc} (l_p - l) \left[1 + \left(\frac{r\pi E \sigma_t \varepsilon_{fc}}{4K_{fc}^2} \right)^v \right]^{-\frac{1}{v}} \right]^2 - \varepsilon_{th}^2 K_{fc}^4 l_p^2}{K_{fc}^2 l_p - \left[K_{I_{max}}^2 l + K_I^2 (l_p - l) \left[1 + \left(\frac{r\pi E \sigma_t \varepsilon_{fc}}{4K_{fc}^2} \right)^v \right]^{-\frac{1}{v}} \right]} . \quad (7)$$

Проінтегрувавши попереднє рівняння (7) із використанням крайових умов

$$N = 0, \quad l(0) = l_0, \quad N = N_*, \quad l(N_*) = l_{*}, \quad (8)$$

отримаємо формулу для обчислення періоду докритичного росту тріщини:

$$N_* = \frac{\varepsilon_{fc} K_{fc}^2 l_p}{\alpha \delta_{fc} (1-R)^2} \cdot \int_{l_0}^{l_*} \frac{\left[\varepsilon_{fc} K_{fc}^2 l_p - \left[\varepsilon_{fc} K_{I_{max}}^2 l + K_I^2 \varepsilon_{fc} (l_p - l) \left[1 + \left(\frac{r\pi E \sigma_t \varepsilon_{fc}}{4K_{fc}^2} \right)^v \right]^{-\frac{1}{v}} \right]^2 \right]}{\left[\varepsilon_{fc} K_{I_{max}}^2 l + K_I^2 \varepsilon_{fc} (l_p - l) \left[1 + \left(\frac{r\pi E \sigma_t \varepsilon_{fc}}{4K_{fc}^2} \right)^v \right]^{-\frac{1}{v}} \right]^2 - \varepsilon_{th}^2 K_{fc}^4 l_p^2} dl . \quad (9)$$

Отже, формула (9) дає змогу обчислювати залишковий ресурс тонкостінних елементів конструкцій з короткими тріщинами.

Точність та коректність запропонованої моделі перевірено у порівнянні з експериментальними даними для пластини з двома боковими концентраторами напруження.

У випадку рівності нулеві початкової тріщини $l_0 = 0$, процес руйнування елемента конструкції слід розділити на два етапи: зародження макротріщини та її докритичний ріст. Відповідно, визначаючи довговічність конструктивного елемента, слід обчислити період зародження макротріщини N_i та період її докритичного росту

N_{subcr}

$$N_{subcr}^* = N_i + N_{subcr} \quad (10)$$

Спершу визначимо період зародження тріщини на основі запропонованої моделі (9) за формулою

$$N_i = \frac{\varepsilon_{fc} K_{fc}^2 l_p}{\alpha \delta_{fc} (1-R)^2} \cdot \int_0^{l_p} \frac{\left[\varepsilon_{fc} K_{fc}^2 l_p - \left[\varepsilon_{fc} K_{I_{max}}^2 l + K_I^2 \varepsilon_{fc} (l_p - l) \left[1 + \left(\frac{r\pi E \sigma_t \varepsilon_{fc}}{4K_{fc}^2} \right)^v \right]^{-\frac{1}{v}} \right]^2 \right]}{\left[\varepsilon_{fc} K_{I_{max}}^2 l + K_I^2 \varepsilon_{fc} (l_p - l) \left[1 + \left(\frac{r\pi E \sigma_t \varepsilon_{fc}}{4K_{fc}^2} \right)^v \right]^{-\frac{1}{v}} \right]^2 - \varepsilon_{th}^2 K_{fc}^4 l_p^2} dl . \quad (11)$$

Тоді обчислимо період докритичного росту макротріщини. При рості макротріщини її довжина перевищує розмір пластичної зони, тому формула (7) для цього випадку набуде наступного вигляду:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{\alpha \delta_{fc} (1-R)^2}{\varepsilon_{fc}^2 K_{fc}^2} \cdot \frac{\varepsilon_{fc}^2 K_{I_{max}}^4 - \varepsilon_{th}^2 K_{fc}^4}{K_{fc}^2 - K_{I_{max}}^2} . \quad (12)$$

Проінтегрувавши формулу (12) із використанням початкових та кінцевих умов $N = N_i, \quad l(N_i) = l_p, \quad N = N_*, \quad l(N_*) = l_*$, визначимо період докритичного росту макротріщини

$$N_{subcr} = \frac{\varepsilon_{fc}^2 K_{fc}^2}{\alpha \delta_{fc} (1-R)^2} \cdot \int_{l_p}^{l_s} \frac{K_{fc}^2 - K_{lmax}^2}{\varepsilon_{fc}^2 K_{lmax}^4 - \varepsilon_{th}^2 K_{fc}^4} dl. \quad (13)$$

Звідси загальний період докритичного росту конструктивного елементу N_{subcr}^* визначимо, додавши обчислені значення періоду зародження макротріщини та періоду її докритичного росту. На рис. 2 представлено залежність загального періоду докритичного росту тріщини N_{subcr}^* від прикладеного навантаження.

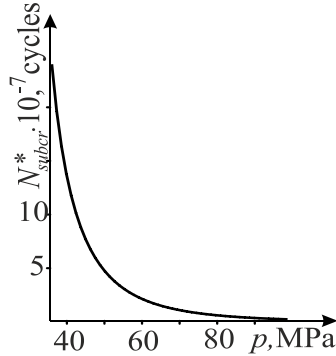


Рис. 2. Залежність періоду докритичного росту тріщини від прикладеного навантаження

Висновки. У роботі запропоновано метод для визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій за змінних навантажень. Вважається, що початкові тріщини короткі (фізично короткі), а елемент конструкції підданий дії циклічного навантаження. В основу методу покладено математичну модель дослідження росту коротких втомних тріщин за допомогою деформаційних параметрів. Застосування методу продемонстровано на прикладі знаходження залишкового ресурсу смуги з двома гладкими концентраторами.

Література

1. Ritchie R.O. Mechanics and Physics of the Growth of Small Cracks / R.O. Ritchie, S. Suresh // AGARD Conf. Proc, No. 328. – Toronto, 1983. – P. 1.1-1.14.
2. Miller K.J. The Behaviour of Short Fatigue Cracks and Their Initiation. Pt. II. A general summary / K.J. Miller // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1987. – 10. – P. 93-113.
3. Андрейків О.Є. Енергетичний підхід до оцінки швидкості росту коротких утомних тріщин у пластинах / О.Є. Андрейків, Н.С. Штаюра, Р.Я. Ярема // Проблеми прочності. – 2017. – №6. – С. 53-63.
(Andreykiv O.E. Energy-Based Approach to Evaluation of Short Fatigue Crack Growth Rate in Plates / O.E. Andreykiv, N.S. Shtayura, R.Ya. Yarema // Strength of Materials. – November 2017. – Vol. 49. – No. 6. – P.778-787.)
4. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4 т. / Под общей ред. Панасюка В.В. – Киев : Наук. думка, 1988 – 488 с.
5. Андрейкив А.Е. Усталостное разрушение и долговечность конструкций / А.Е. Андрейкив, А.И. Дарчук // АН Украины. – Физ.-мех. ин-т. – Киев : Наук. думка, 1992. – 184 с.
6. Андрейків О.Є. Оцінювання залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій з короткими корозійно-втомними тріщинами / О.Є. Андрейків, А.Р. Лисик, Н.С. Штаюра, А.В. Бабій // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2017. – № 4. – С.84-90.
(Andreykiv O.E. Evaluation of the Residual Service Life of Thin-Walled Structural Elements with Short Corrosion-Fatigue Cracks / O.E. Andreykiv, A.R. Lysyk, N.S. Shtayura, A.V. Babii // Materials Science. – January 2018. – Vol. 53. – No. 4. – P.514-521.)