

УДК 539.432

О. Герасимчук, д.т.н., с.н.с., О. Кононученко, к.т.н., с.н.с.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

## МОДЕЛЬ ШВИДКОСТІ РОСТУ КОРОТКОЇ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ

O. Herasymchuk, Dr., O. Kononuchenko, Ph.D.

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

### SHORT FATIGUE CRACK GROWTH RATE MODEL

**Abstract.** The proposed model allows to calculate the kinetic curves of short fatigue crack growth rate in structural elements with a blunt notch and to estimate the number of cycles from the moment of initiation of the crack to reach a certain size, using only the characteristics of monotonic strength and microstructure of the initial material.

**Вступ.** На сьогодні загально прийнято розділяти процес втомного руйнування металевих матеріалів, які знаходяться під дією змінних навантажень, на стадію зародження втомної тріщини і стадію її росту до руйнування. У свою чергу, стадію росту підрозділяють на стадії росту *короткої* та росту *довгої* тріщини, оскільки їхні кінетики росту суттєво відрізняються. Частка довговічності, що припадає на ріст короткої тріщини, може перевищувати ріст довгої тріщини до руйнування, а за наявності концентратора напружень може бути переважаючою у загальній довговічності. Отже, необхідність мати достовірні й доволі прості, з інженерної точки зору, рівняння для швидкості росту коротких тріщин є актуальною для проблеми прогнозування довговічності елементів конструкцій, в яких допускається наявність тріщин певного розміру.

**Опис моделі.** У даній праці пропонується модель для описання кінетики швидкості росту короткої втомної тріщини від тупого концентратора напружень. За рушійну силу втомної тріщини приймається ефективний розмах КІН  $\Delta K_{eff}$ , що визначається як різниця між прикладеним розмахом КІН  $\Delta K$  і розмахом КІН  $\Delta K_R$ , який характеризує опір матеріалу росту тріщини. Модель дозволяє розрахувати кінетичну діаграму швидкості росту короткої втомної тріщини від концентратора та оцінити втомну довговічність (кількість циклів навантаження  $N$ ) від моменту ініціювання тріщини  $l=0$  до моменту досягнення нею певного розміру  $l=l_t$  за постійного розмаху прикладених номінальних напружень  $\Delta\sigma_{nom}$ . Рівняння швидкості росту  $dl/dN$  такої тріщини пропонується у наступному вигляді:

$$\frac{dl}{dN} = C \left\{ \left( \Delta K - (\Delta K_{th} - \Delta K_{th,eff}) \left( 2 - e^{-k_1(l)} - e^{-k_2(l)} \right) \right)^3 - \Delta K_{th,eff}^3 \right\} \quad (1)$$

де  $C = b / \Delta K_{th,eff}^3$ ,  $\Delta K_{th,eff}$  – пороговий ефективний розмах КІН;  $b$  – мінімальна швидкість тріщини, яка дорівнює одній міжатомній відстані у напрямку вектора Бюрґерса за цикл і відповідає прикладеному розмаху КІН, що дорівнює  $\Delta K_{th,eff}$ ;  $\Delta K_{th}$  – порогове значення прикладеного розмаху КІН циклу для довгих тріщин;  $k_1(l)$  і  $k_2(l)$  – параметри матеріалу, які визначають швидкість розвитку ефекту закриття тріщини (ЗТ) та інших ефектів із ростом тріщини;  $k_1(l)$  враховує дію механізму ЗТ, зумовленого шорсткістю поверхонь руйнування, що діє на початковому етапі росту тріщини, а  $k_2(l)$  – механізму пластичного деформування поверхонь руйнування та інших ефектів

короткої тріщини. Від точності визначення параметрів  $k_1(l)$  і  $k_2(l)$  залежить точність визначення кривої опору  $\Delta K_R$  (від'ємник у квадратних дужках рівняння (1)), яка залежить від рівня навантаження і його історії, а відтак і точність розрахунку кінетичної кривої швидкості росту короткої тріщини. Прикладений розмах КІН  $\Delta K$  для короткої тріщини визначається, використовуючи поправку Ель Гаддада  $l_D$ , наступним чином:

$$\Delta K = \Delta \sigma Y \sqrt{\pi(l + l_D)}, \quad (2)$$

де  $\Delta \sigma$  – прикладений розмах напружень;  $Y$  – геометричний фактор (визначається за формулами з довідників);  $l_D = (\Delta K_{th} / \sqrt{\pi} Y \Delta \sigma_e)^2$ ,  $\Delta \sigma_e$  – границя витривалості гладких зразків. Параметри рівняння (1):  $\Delta K_{th,eff}$ ,  $\Delta K_{th}$  і  $\Delta \sigma_e$  можна визначити експериментально за стандартними методиками. Натомість їх можна також оцінити за формулами, запропонованими у [1]. Параметри  $k_1(l)$  і  $k_2(l)$  визначаються так:

$$k_1(l) = ((l - d) / l_D) (\Delta \sigma / \Delta \sigma_e)^2; \quad k_2(l) = ((l - d) / 12d) (Y \cdot \sigma_{max} / \sigma_Y)^2, \quad (3)$$

де  $\sigma_Y$  – напруження початку макротекучості;  $\sigma_{max}$  – прикладене максимальне напруження циклу;  $d$  – розмір зерна.

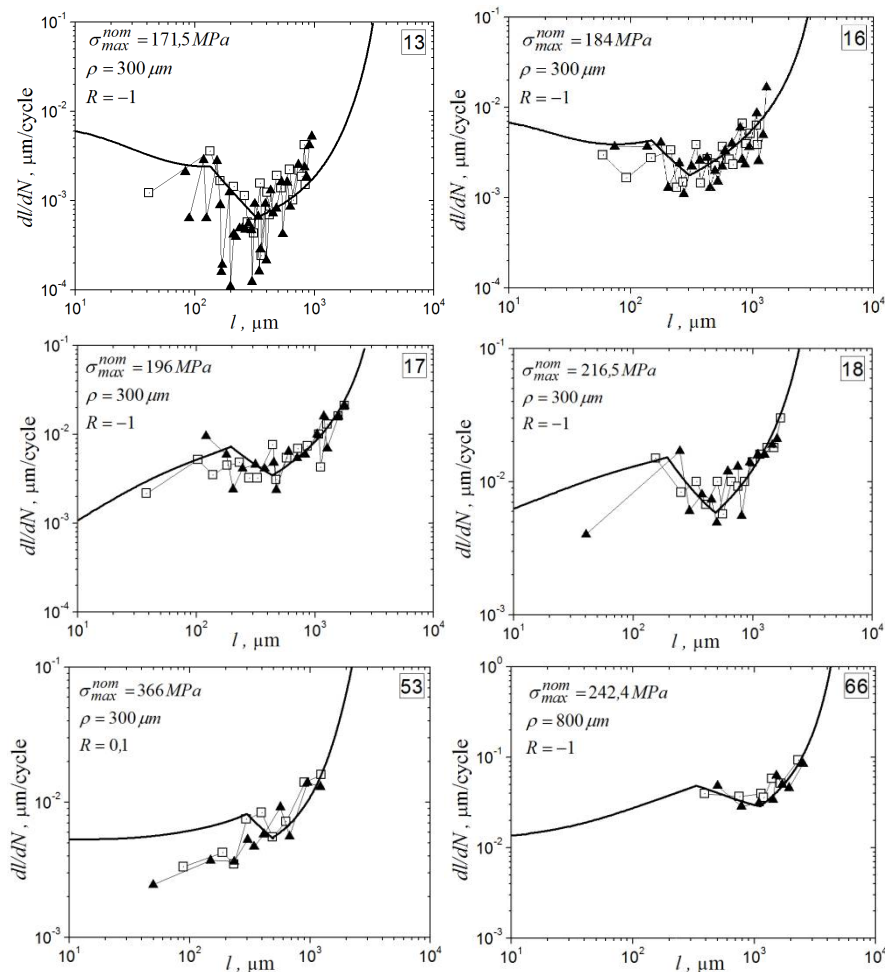


Рис. 1. Порівняння розрахованих кінетичних кривих (лінії) з експериментальними даними (ріст тріщин із протилежних боків отвору на поверхні зразка позначено різними значками).

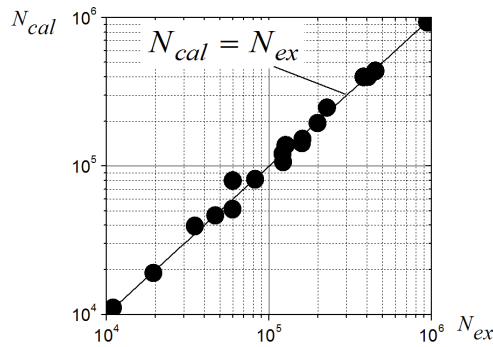


Рис. 2. Порівняння розрахованої та визначеної експериментально кількості циклів під час росту тріщини для 18 випробуваних зразків.

За наявності тупого концентратора, потрібно знати розподіл локального напруження  $\sigma_{loc}(l)$  в його околі. Для отворів добре підходить вираз  $\sigma_{loc}(l) = \sigma_{nom} \cdot K_t / \sqrt{1 + 4.5l/\rho}$ , де  $\rho$  – радіус вершини концентратора,  $K_t = \sigma_{loc}(0) / \sigma_{nom}$ , теоретичний коефіцієнт концентрації напружень. Тоді рівняння (1) записується для трьох ділянок росту тріщини. На першій ділянці від 0 до  $l_c$ , тобто в межах критичної відстані, припускається, що тріщина росте під дією постійного розмаху локальних напружень  $\Delta\sigma = \Delta\sigma_{loc}(l_c)$ , де  $l_c = (E\sqrt{b}/\sigma_{-1,e})^2$ ,  $\sigma_{-1,e}$  – границя витривалості гладких зразків за симетричного циклу,  $E$  – модуль пружності. На другій ділянці, від  $l_c$  до  $l_z$ , тріщина росте під дією змінного розмаху локальних напружень  $\Delta\sigma = \Delta\sigma_{loc}(l)$ , де  $l_z = \rho(K_t^2 - 1)/4.5$  – межа зони впливу концентратора, і на третій ділянці тріщина росте вже під дією постійного  $\Delta\sigma = \Delta\sigma_{nom}$ . Кількість циклів  $N$  під час росту тріщини визначається сумою результатів інтегрування рівняння (1) на трьох ділянках росту.

На рис. 1 наведено розраховані за моделлю (1) кінетичні криві швидкості росту кутової чверть-кругової поверхневої тріщини від отвору в зразках зі сталі 45 із глухим отвором різного діаметру за різних рівнів прикладеного номінального максимального напруження циклу  $\sigma_{max}^{nom}$  і різної асиметрії циклу  $R$  у порівнянні з експериментальними даними, а на рис. 2 – порівняння розрахованої  $N_{cal}$  та визначеної експериментально  $N_{ex}$  кількості циклів під час росту такої тріщини для випробуваних зразків. У розрахунках було використано наступні вихідні дані:  $\nu = 0.3$ ;  $E = 2.1 \cdot 10^5$  МПа;  $\sigma_Y = 374.4$  МПа;  $b = 2.108 \cdot 10^{-10}$  м;  $d = 50 \cdot 10^{-6}$  м;  $\rho_1 = 0.3 \cdot 10^{-3}$  м,  $K_{t,1} = 2.88$ ;  $\rho_2 = 0.8 \cdot 10^{-3}$  м,  $K_{t,2} = 2.7$ .

**Висновки.** Запропонована модель дозволяє розрахувати кінетичні криві швидкості росту короткої тріщини від тупого концентратора напружень в елементах конструкцій з металевих матеріалів і визначити кількість циклів від моменту ініціювання тріщини до досягнення нею певного розміру, використовуючи при цьому тільки характеристики статичної міцності та мікроструктури вихідного матеріалу.

#### Література.

1. Herasymchuk O. M. Microstructurally-dependent model for predicting the kinetics of physically small and long fatigue crack growth / O. M. Herasymchuk. // Int. J. Fatigue. – 2015. – №81. – С. 148–161.