

УДК 539.432

Олег Герасимчук, д.т.н., с.н.с.; Олег Кононученко, к.т.н., с.досл.

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

ОЦІНКА ВТОМНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ДО ІНІЦІЮВАННЯ ТРІЩИНИ ВІД КОНЦЕНТРАТОРА НАПРУЖЕНЬ У СТАЛЕВИХ ЗРАЗКАХ ЗА ЗМІННОГО РОЗМАХУ НАПРУЖЕНЬ ЦИКЛУ

Анотація. Запропоновано модель для теоретичної (не експериментальної) оцінки втомної довговічності до моменту ініціювання втомної тріщини у зразках із концентратором напружень за змінного (ступінчастого) прикладеного розмаху напружень циклу. Модель враховує нелінійність накопичення втомного пошкодження. Історія зміни розмаху напружень циклу враховується в моделі при переході від більшого розмаху до меншого, використовуючи вплив розміру локальної пластичної зони від вершини концентратора на величину прикладеного локального максимального напруження циклу. Вихідними даними для теоретичної оцінки, окрім параметрів навантаження і геометричних розмірів поперечного перерізу зразка та концентратора, є характеристики статичної міцності та мікроструктури вихідного матеріалу.

Ключові слова: ступінчасте циклічне навантаження; стадія зародження втомної тріщини; втомна довговічність; концентратор напружень; сталь 45.

Oleh Herasymchuk, Ph.D.; Oleh Kononuchenko, Ph.D.

ESTIMATION OF FATIGUE LIFE UNTIL CRACK INITIATION FROM A NOTCH IN STEEL SPECIMENS AT VARIABLE CYCLE STRESS RANGE

Abstract. A model is proposed for theoretical (non-experimental) evaluation of fatigue life until crack initiation from a notch in metallic samples at variable applied cycle stress range, using only the characteristics of monotonic strength and microstructure of the initial material.

Key words: step cyclic load; fatigue crack nucleation stage; fatigue life; notch; steel 0.45%С.

Вступ. Після того, як було встановлено, що правило Пальмгрена-Майнера лінійного підсумовування втомного пошкодження не завжди виконується для різних режимів зміни прикладеного розмаху напружень циклу, багатьма дослідниками було запропоновано безліч схем для розрахунку кількості циклів до руйнування зразків за змінних режимів циклічного навантаження [1]. Всі сучасні моделі втомної довговічності за змінного розмаху напружень циклу використовують результати випробувань на втому і втомну тріщиностійкість за постійного розмаху. З аналізу літературних джерел щодо використання у дослідженнях різних спектрів навантаження, можна зробити висновок, що для розробки і перевірки нової методики оцінки втомного пошкодження немає необхідності застосовувати складні режими циклічного навантаження, які характерні і стандартизовані для окремих елементів конструкцій. Достатньо дослідити та оцінити пошкодження матеріалів за двоступінчастих циклічних навантаженнях на рівнях: високі – низькі (*H-L – high-low*) та низькі – високі (*L-H – low-high*) з варіюванням різниці рівнів і кількості циклів навантаження на низькому та високому рівнях [2].

Метою роботи є розроблення моделі для оцінки кількості циклів одновісного навантаження металевих зразків до моменту ініціювання втомної тріщини від концентратора напружень за ступінчастих режимів зміни прикладеного розмаху напружень циклу, враховуючи при цьому кінетику накопичення пошкоджень та історію зміни розмаху напружень і не використовуючи експериментально встановлених втомних даних для даного матеріалу.

Опис моделі. Степеневе рівняння для розрахунку втомного пошкодження D_i на стадії зародження тріщини ($0 \leq D_i \leq 1$), яке відображає кінетику накопичення цього пошкодження за *постійного* прикладеного розмаху напружень циклу $\Delta\sigma_i$ пропонується у наступному вигляді:

$$D_i = (n / N_{in,i})^{m_D}, \quad (1)$$

n – кількість циклів навантаження; $N_{in,i}$ – кількість циклів навантаження до появи тріщини за прикладеного розмаху напружень циклу $\Delta\sigma_i$:

$$N_{in,i} = \left(\frac{\beta}{\Delta\sigma_i - \Delta\sigma_{R,e}} \right)^{m_{in} - 1}; \quad (2)$$

$$\beta = \frac{40EM}{\xi(1+\nu)\sqrt{\pi(1-\nu)}}; \quad (3)$$

$$m_D = 1 / (1 + m_{in} / 2). \quad (4)$$

$$m_{in} = 3 \frac{\lg(E\sqrt{b}) - \lg K_F}{\lg \Delta K_{th,in} - \lg K_F}, \quad (5)$$

$$\lg K_F = \frac{1}{3} \left[3 \lg(E\sqrt{b}) + \lg(10^{-5} / v_0) \right], \quad (6)$$

де K_F – коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) під час руйнування на рівні швидкості росту тріщини $dl/dN = 10^{-5}$ м/цикл; v_0 – мінімальна швидкість тріщини, яка дорівнює одній міжатомній відстані b у напрямку вектора Бюргерса \vec{b} за цикл; E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуассона; M – фактор Тейлора; ξ – критична гострота інтрузії, відношення її глибини до радіусу вістря, характеристика матеріалу, яка розраховується залежно від розміру зерна d [3]; $\Delta\sigma_{R,e}$ – *нижня* межа границі витривалості гладких зразків у термінах розмаху напружень циклу за асиметрії R , мінімальний розмах напружень, необхідний для ініціювання тріщини, характеристика матеріалу, яка розраховується залежно від розміру зерна d [3]; m_{in} – показник степеня у рівнянні початкової швидкості росту шойно ініційованої тріщини:

$$dl/dN = v_0 (\Delta K_i / \Delta K_{th,in})^{m_{in}}, \quad (7)$$

ΔK_i – прикладений розмах КІН, $\Delta K_i = f(\Delta\sigma_i, l)$; l – лінійний розмір тріщини; $\Delta K_{th,in}$ – внутрішній пороговий розмах КІН, оцінюється за формулою [4]:

$$\Delta K_{th,in} = \frac{\sqrt{12}M}{8\sqrt{\pi}(1+\nu)} \sqrt{\frac{|\vec{b}|}{h}} E\sqrt{b}; \quad (8)$$

h – відстань між сусідніми паралельними площинами ковзання у кристалічній ґратці; b – усереднена величина вектора Бюргерса \vec{b} для крайових і гвинтових дислокацій, $b = |\vec{b}|(2-\nu)/2$;

За наявності тупого концентратора напружень з радіусом вершини ρ у рівнянні (2) використовується прикладений розмах локальних напружень циклу, тобто $\Delta\sigma_i = \Delta\sigma_{loc,i} = \sigma_{max,i}^{loc}(1-R)$, де $\sigma_{max,i}^{loc}$ розраховується наступним чином [3]:

$$\sigma_{max,i}^{loc} = K_t \sigma_{max,i}^{nom} / \sqrt{1 + 4,5l_{c,R,max,i} / \rho}, \quad (9)$$

де $l_{c,R,\max,i}$ – критична відстань від вершини концентратора, на якій визначається $\sigma_{\max,i}^{loc}$ з розподілу пружних локальних напружень за $\sigma_{\max,i}^{nom}$:

$$l_{c,R,\max,i} = l_{c,R} \left(\frac{K_t \sigma_{\max,i}^{nom} / \sqrt{1 + 4,5l_{c,R} / \rho}}{\sigma_{\max,R,e}} \right)^{(m_{in}-1)m_D}; \quad (10)$$

$l_{c,R}$ – критична відстань для додатних асиметрій циклу ($1 > R \geq 0$) за $\sigma_{\max,i}^{loc} = \sigma_{\max,R}$:

$$l_{c,R} = l_{c,-1} [2(1-R)]^{1/(m_{in}-1)}, \quad (11)$$

$$l_{c,-1} = E^2 b / \sigma_{-1}^2; \quad (12)$$

σ_{-1} – границя витривалості гладких зразків за симетричного циклу; K_t – теоретичний коефіцієнт концентрації напружень, $K_t = \sigma_y(x=0) / \sigma_{nom}$; $\sigma_y(x)$ – розподіл пружних локальних напружень від вершини тупого концентратора, $\sigma_y(x) = \sigma_{nom} \cdot K_t / \sqrt{1 + 4,5x / \rho}$; σ_{nom} – номінальне напруження; $\sigma_{\max,i}^{nom}$ – номінальне максимальне напруження циклу.

У зразках із концентратором після переходу від більшого розмаху локальних напружень до меншого ($H-L$) розмір критичної відстані залишається той самий, що сформувався за більшого розмаху, тобто $l_{c,R,\max,H}$. Отже, у цьому випадку під час розрахунку пошкодження на нижчому ступені L локальне напруження $\sigma_{\max,L(H)}^{loc}$ слід оцінювати, використовуючи формулу (11), наступним чином:

$$\sigma_{\max,L(H)}^{loc} = K_t \sigma_{\max,L}^{nom} / \sqrt{1 + 4,5l_{c,R,\max,H} / \rho}, \quad (13)$$

Тобто розмах локальних напружень на ступені L , розрахований за формулою (13), буде меншим, ніж розрахований за формулою (9) для однакового розмаху номінальних напружень, оскільки $l_{c,R,\max,H} > l_{c,R,\max,L}$. При цьому номінальне максимальне напруження циклу на ступені L не змінюється. Якщо послідовність ступенів $H-L$ або $L-H$ періодично повторюється, то критична відстань $l_{c,R,\max,H}$ формується під час першої появи ступеня H і залишається такого ж розміру до завершення стадії 1. Припускається, що у гладких зразках за одновісного розтягу-стиску або розтягу-розтягу цей ефект відсутній, оскільки за будь-якої критичної відстані розмах локальних напружень дорівнює розмаху номінальних напружень. Натомість у гладких зразках, які знаходяться в умовах неоднорідного напруженого стану (циклічний згин, циклічне кручення), вказаний ефект послідовності $H-L$ також буде відбуватись.

Оскільки рівняння пошкодження (1) застосовується з єдиним показником степеня m_D для різних рівнів $\Delta\sigma_i$, то внаслідок подібності процесу його накопичення, для оцінки кількості циклів до ініціювання тріщини \tilde{N}_{in} за змінного розмаху напружень можна використовувати лінійне правило підсумовування пошкоджень у вигляді:

$$\sum_i (n_i / N_{in,i}) = 1, \quad (14)$$

де n_i – кількість циклів на кожному ступені. Тоді

$$\tilde{N}_{in} = \sum_i n_i. \quad (15)$$

На рис. 1,а наведено схему ступінчастого циклічного навантаження зразків за режимами $H-L$ і $L-H$, а на рис. 1,б – порівняння розрахованої \tilde{N}_{in}^{calc} та визначеної експериментально $\tilde{N}_{in,0}^{exp}$ кількості циклів до ініціювання тріщини для випробуваних зразків за різних режимів ступінчастої зміни розмаху напружень з варіюванням n_i та σ_{max} . У розрахунках було використано наступні вихідні дані для зразків зі сталі 45 із глухим отвором [3]: $\nu = 0,3$; $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $\sigma_Y = \sigma_{0,2} = 468$ МПа; $|\bar{b}| = 2,48 \cdot 10^{-10}$ м, отже $b = |\bar{b}|(2 - \nu)/2 = 2,108 \cdot 10^{-10}$ м; $h = 0,707 \cdot |\bar{b}| = 1,753 \cdot 10^{-10}$ м; $M = 2$; $d = 50 \cdot 10^{-6}$ м; $\rho = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м, $K_t = 2.88$. Як видно з рис. 1,б розрахунок добре збігається з експериментальними результатами.

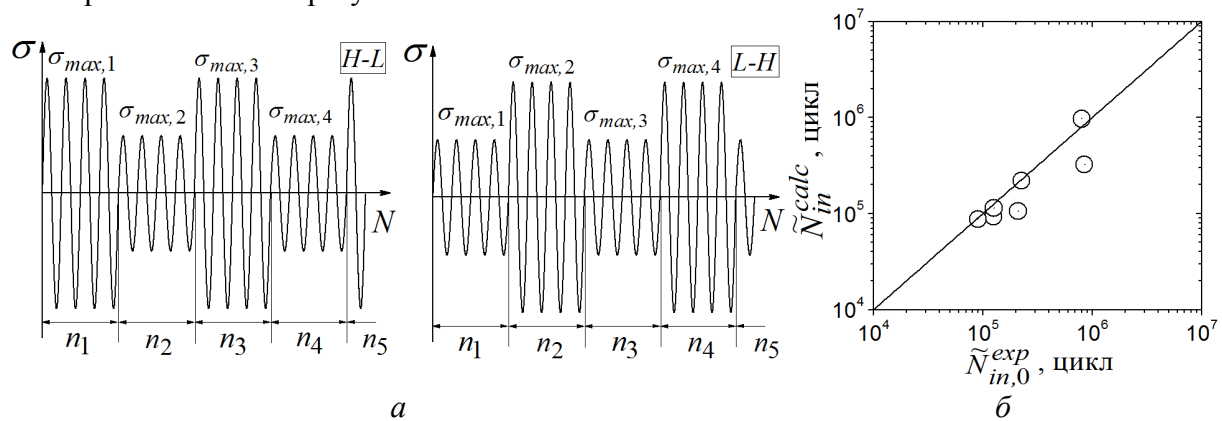


Рис. 1. а – схема ступінчастого циклічного навантаження; б – порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними.

Висновки. Запропонована модель втомної довговічності дає можливість розрахувати кількість циклів навантаження до моменту ініціювання тріщини від тупого концентратора напружень у зразках/елементах конструкцій за змінного розмаху прикладених номінальних напружень циклу, використовуючи при цьому, як вихідні дані, тільки характеристики статичної міцності: $E, \nu, \sigma_{0,2}$ та мікроструктури: d, M, b вихідного матеріалу.

Перелік посилань

1. Santecchia E., Hamouda A. M. S., Musharavati F. et al. “A Review on fatigue life prediction methods for metals”. Adv. Mater. Sci. Eng. 2016. P. 1-26.
2. Zakaria K.A., Abdullah S. and M.J. Ghazali “A Review of the Loading Sequence Effects on the Fatigue Life Behaviour of Metallic Materials”. Journal of Engineering Science and Technology Review. 2016. 9 (5). P. 189 – 200.
3. Herasymchuk O.M., Kononuchenko O.V. “Theoretical estimation of fatigue life before crack initiation in metal materials” Strength of Materials, 2023, 55(3), P. 457-468.
4. K. S. Chan, “Variability of large-crack fatigue-crack-growth thresholds in structural alloys”, Metall. Mater. Trans. A., 35A, 3721–3735 (2004).