

Секція: МЕХАНІКА РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

УДК 539.432

Олег Герасимчук, доктор технічних наук, старший науковий співробітник,

Олег Кононученко, кандидат технічних наук, старший дослідник

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

ОЦІНКА ВТОМНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ СТАЛЕВИХ ЗРАЗКІВ ЗА ЗМІННОГО РОЗМАХУ НАПРУЖЕНЬ ЦИКЛУ

Анотація. Запропоновано модель для розрахунку втомної довговічності металевих зразків із концентратором напружень за змінного (ступінчастого) прикладеного розмаху напружень циклу. Модель враховує нелінійність накопичення втомного пошкодження та історію зміни розмаху напружень циклу на обох стадіях процесу втомного руйнування. Вихідними даними для розрахунку, окрім параметрів навантаження і геометричних розмірів поперечного перерізу зразка та концентратора, є характеристики пружно-пластичних властивостей, які отримують із випробувань зразків на монотонний розтяг, та характеристики мікроструктури вихідного матеріалу. Ключові слова: ступінчасте циклічне навантаження; стадія зародження втомної тріщини; стадія росту втомної тріщини; втомна довговічність;

Oleh Herasymchuk, Dr., Oleh Kononuchenko, Ph.D.

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

ESTIMATION OF THE FATIGUE LIFE OF STEEL SPECIMENS UNDER VARIABLE CYCLIC STRESS RANGE

Abstract. A model is proposed for calculation of the fatigue life of metal specimens with a notch under variable (stepwise) applied cycle stress range, based on elastic-plastic and microstructure characteristics of the initial material.

Keywords: step cyclic load; fatigue crack nucleation stage; fatigue crack growth stage; fatigue life.

Всі сучасні моделі втомної довговічності (або накопичення втомного пошкодження) за змінного розмаху напружень циклу використовують результати випробувань зразків на втому і втомну тріщиностійкість за постійного розмаху. Метою представленої роботи є розроблення моделі для розрахунку кількості циклів одновісного навантаження металевих зразків до моменту ініціювання втомної тріщини від концентратора напружень і під час її росту до руйнування 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 матеріалу. Тобто, вихідними даними для такого розрахунку є характеристики пружно-пластичних властивостей і мікроструктури матеріалу.

Опис моделі. Оскільки процес втомного руйнування розділяють на дві основні стадії: стадію зародження втомної тріщини до моменту її ініціювання (стадію 1) і стадію росту цієї тріщини до руйнування (стадію 2), для розробки моделі розрахунку тривалості кожної стадії застосовуються різні підходи.

Стадія 1. Степеневе рівняння для розрахунку втомного пошкодження D_i на стадії 1 ($0 \leq D_i \leq 1$), яке відображає кінетику накопичення цього пошкодження за i -го прикладеного розмаху напружень циклу $\Delta\sigma_i$ пропонується у наступному вигляді:

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

$$m_D = 1 / (1 + m / 2), \quad (2)$$

n – кількість циклів навантаження; $N_{in,i}$ – кількість циклів навантаження до появи тріщини за прикладеного розмаху напружень циклу $\Delta\sigma_i$ [1],

$$N_{in,i} = \left(\frac{40EM}{\xi(1+\nu)\sqrt{\pi(1-\nu)}(\Delta\sigma_i - \Delta\sigma_{R,e})} \right)^{m-1}; \quad (3)$$

де 40 – універсальна константа; E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуассона; M – фактор Тейлора; ξ – критична гострота інтрузії, відношення її глибини до радіусу вістря, характеристика матеріалу, розрахунковий параметр [1]; $\Delta\sigma_{R,e}$ – нижня межа границі витривалості гладких зразків у термінах розмаху напружень циклу за асиметрії R , мінімальний розмах напружень, необхідний для ініціювання тріщини, характеристика матеріалу, розрахунковий параметр [1]; m – показник степеня у рівнянні швидкості росту тріщини [1].

За наявності тупого концентратора напружень (або отвору) з радіусом вершини ρ у рівнянні (3) 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 [1]:

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

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

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

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

$$l_{c,R} = l_{c,-1} [2 / (1 - R)]^{1 / (m-1)^2}, \quad (6)$$

$$l_{c,-1} = E^2 b / \sigma_{-1}^2; \quad (7)$$

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, $\sigma_y(x) = \sigma_{nom} \cdot K_t / \sqrt{1 + 4,5 x / \rho}$; σ_{nom} – номінальне напруження; $\sigma_{max,i}^{nom}$ – номінальне максимальне напруження циклу.

У зразках із концентратором за ступінчастого циклічного навантаження 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 нижньому

ступені L локальне напруження $\sigma_{\max,L(H)}^{loc}$ слід оцінювати, використовуючи формулу (4), наступним чином:

$$\sigma_{\max,L(H)}^{loc} = K_t \sigma_{\max,L}^{nom} / \sqrt{1 + 4,5 l_{c,R,\max,H} / \rho}, \quad (8)$$

Тобто розмах локальних напружень на ступені L , розрахований за формулою (8), буде меншим, ніж розрахований за формулою (4) для однакового розмаху номінальних напружень, оскільки $l_{c,R,\max,H} > l_{c,R,\max,L}$. 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 тривалості стадії 1 $\tilde{N}_{in}$ за змінного розмаху напружень можна використовувати лінійне правило підсумовування пошкоджень у вигляді:

$$\sum_i (n_i / N_{in,i}) = 1, \quad (9)$$

де n_i – кількість циклів на кожному ступені. Тоді

$$\tilde{N}_{in} = \sum_i n_i. \quad (10)$$

Стадія 2. Кількість циклів навантаження під час росту втомної тріщини до руйнування (тривалість стадії 2) N_{FCG} отримаємо в результаті чисельного інтегрування рівняння швидкості її росту від $l = 0$ до $l = l_t$, де l_t – кінцевий лінійний розмір тріщини, який приймається за критерій руйнування від втоми [1]:

$$N_{FCG} = \frac{(\Delta K_{th,in})^m}{v_0} \int_0^{l_t} [(\Delta K_e)^m - (\Delta K_{th,in})^m]^{-1} dl, \quad (11)$$

де v_0 – мінімальна швидкість росту тріщини, яка дорівнює одній міжатомній відстані b у напрямку вектора Бюргерса $\vec{b}$ за цикл; ΔK_e – ефективна рушійна сила втомної тріщини

$$\Delta K_e = \Delta K - (\Delta K_{th,R} - \Delta K_{th,in})(2 - e^{-k_1(\Delta\sigma,l)} - e^{-k_2(\Delta\sigma,l)}); \quad (12)$$

ΔK – прикладений розмах КІН, $\Delta K = f(\Delta\sigma, l)$; $\Delta K_{th,R}$ – пороговий розмах КІН для довгих тріщин за асиметрії R ; $\Delta K_{th,in}$ – «внутрішній» пороговий розмах КІН [2]; $k_1(\Delta\sigma, l)$, $k_2(\Delta\sigma, l)$ – параметри, які враховують зростання ефекту закриття тріщини за різними механізмами в процесі росту короткої тріщини і які залежать від рівня прикладеного розмаху напружень циклу $\Delta\sigma$ та лінійного розміру тріщини l . Розрахунок $\Delta K_{th,R}$, $k_1(\Delta\sigma, l)$, $k_2(\Delta\sigma, l)$ та m детально описано у [1]. За ступінчастого циклічного навантаження після переходу від більшого i -го розмаху напружень H до меншого $(i+1)$ -го розмаху L тріщина розміром l_i^H буде проростати ще через пластичну зону розміром r_p^H , сформовану $K_{\max}^H$ попереду вістря за більшого розмаху напружень. Пропонується кількість циклів $\Delta n_{L(H)}$, необхідних для проходження короткою тріщиною цієї пластичної зони від початку ступеня L , розраховувати за рівнянням:

$$\Delta n_{L(H)} = \frac{(\Delta K_{th,in})^{m_{in}}}{v_0} \int_{l_i^H}^{l_i^H + r_p^H} [(\Delta K_{e,L(H)})^{m_{in}} - (\Delta K_{th,in})^{m_{in}}]^{-1} dl, \quad (13)$$

де $\Delta K_{e,L(H)}$ – ефективна рушійна сила тріщини за меншого прикладеного розмаху напружень $\Delta\sigma_L$, але з ефектом закриття тріщини, який формується від більшого розмаху, оскільки ще немає достатнього напруження для подолання залишкового напруження, яке утримує тріщину

$$\Delta K_{e,L(H)} = \Delta K_L - (\Delta K_{th,R} - \Delta K_{th,in}) \left(2 - e^{-k_{1,H}(\Delta\sigma_H,l)} - e^{-k_{2,H}(\Delta\sigma_H,l)} \right). \quad (14)$$

Тобто ефект закриття тріщини від більшого розмаху напружень враховується параметрами $k_{1,H}(\Delta\sigma_H,l)$ і $k_{2,H}(\Delta\sigma_H,l)$, які визначаються за аналогією з [1].

На рис. 1а наведено розраховану кінетику росту короткої втомної тріщини від моменту її ініціювання $l=0$ до досягнення розміру $l=l_t$ за типової схеми двоступінчастого циклічного навантаження зразка зі сталі 45 за режимом $H-L$, а на рис. 1б, в – порівняння розрахованих $\tilde{N}_{in}^{calc}$, $\tilde{N}_{FCG}^{calc}$ та визначених експериментально $\tilde{N}_{in,0}^{exp}$, $\tilde{N}_{FCG}^{exp}$ тривалостей стадій 1 і 2 для зразків за різних режимів ступінчастої зміни розмаху напружень з варіюванням n_i та $\sigma_{max,i}^{nom}$. У розрахунках було використано вихідні дані для зразків зі сталі 45 із глухим отвором [1]. Як видно з рис. 1, розрахунок добре збігається з експериментальними результатами. Стадія 1 показує більший розкид довговічності, ніж стадія 2, внаслідок суттєвішого впливу мікроструктури на довговічність саме до ініціювання тріщини.

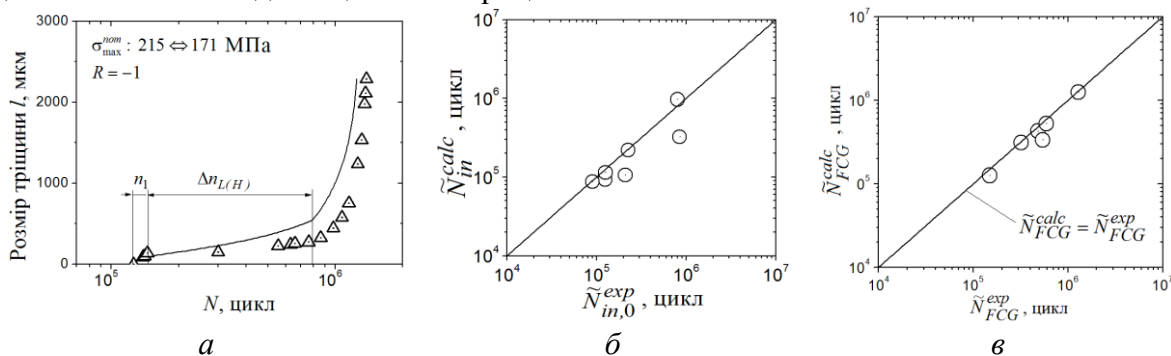


Рисунок 1. Порівняння результатів розрахунку та експерименту для зразків зі сталі 45: а – типова кінетика росту тріщини за схемою двоступінчастого циклічного навантаження $H-L$ (n_1 – задана кількість циклів на рівні H); б, в – довговічності зразків за різних схем двоступінчастого циклічного навантаження на стадіях 1 і 2 відповідно.

Висновки. Запропонована модель втомної довговічності дає змогу прогнозувати кількість циклів навантаження до моменту ініціювання тріщини і під час її росту у зразках/елементах конструкцій за ступінчастої зміни розмаху прикладених номінальних напружень циклу, використовуючи при цьому, як вихідні дані, тільки характеристики пружно-пластичних властивостей: E, ν і напруження текучості $\sigma_{0,2}$ та мікроструктури: M, b і розмір зерна d вихідного матеріалу.

Перелік посилань

1. Herasymchuk O. M., and Kononuchenko O. V. “Model of short fatigue crack growth rate and fatigue life estimation of carbon steel specimens”, *Strength Mater*, (55), 683–698 (2023).
2. Chan K. S. “Variability of large-crack fatigue-crack-growth thresholds in structural alloys”, *Metall. Mater. Trans. A.*, (35A), 3721–3735 (2004).