

Цибаньов Георгій

головний науковий співробітник, д-р техн. наук, Інститут проблем
міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, м.Київ, Україна, e-mail:

tsybanov@ukr.net

ВИЗНАЧЕННЯ ПОЧАТКОВОГО ДЕФЕКТУ МАТЕРІАЛУ ПРИ РОЗРАХУНКАХ ЦИКЛІЧНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ

Анотація. Експоненціальна залежність для опису росту тріщини втомі застосована для визначення початкового дефекту матеріалів при розрахунках багатоциклової довговічності. Для цього використано експериментальні дані для побудови кривої втомі і розрахункова лінія Френча. На прикладі сталі 34CrMo4 показано зміну рівня початкового дефекту у залежності від амплітуди напружень, що пов'язано з особливостями формування субструктури за дії напружень різного рівня.

Ключові слова: крива втомі, стадії втомного пошкодження, лінія Френча, мікроструктура.

Вступ. Втомне руйнування матеріалів є багатостадійним процесом. Стадії зародження і росту коротких тріщин при багатоциклової втомі можуть займати більшу частину довговічності матеріалів, тому для прогнозування тривалості їх протікання, а також при оцінці залишкового ресурсу конструкційних елементів необхідно використовувати характеристики, що описують швидкість та кінетику втомного пошкодження на перших двох стадіях. У дослідженнях [1] показано зв'язок росту коротких тріщин з циклічною пластичною деформацією і запропоновано метод визначення довговічності за ростом коротких тріщин, параметри росту яких визначаються за параметрами кривої Коффіна-Менсона. При цьому відлік росту починається з фіксованого розміру початкової тріщини a_0 , який визначається екстраполяцією експериментальних значень кінетики коротких тріщин на різних рівнях амплітуди напружень на циклічне напруження $N=0$ цикл. В той же час з даних [1] витікає відхилення значень a_0 на різних рівнях амплітуди напружень σ_a . У представленому дослідженні встановлено закономірність зміни початкової тріщини (дефекту) a_0 за різних значень σ_a , що дозволяє більш обґрунтовано описувати кінетику росту мікроструктурно короткої тріщини на початковій стадії втомного пошкодження.



Результати досліджень. У роботах [1-3] показано, що експериментальні дані росту втомних тріщин (вимірюваних як найбільш довгої поверхневої тріщини на різних рівнях

σ_a) при їх зростанні в діапазоні $2 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-3}$ м добре апроксимуються експоненціальною залежністю. Пряма лінія в напівлогарифмічних координатах відповідає залежності:

$$a = a_0 \exp(k_1 N) \quad (1)$$

де a , N - поточні значення довжини тріщини та поточного числа циклів навантаження; a_0 - довжина тріщини при екстраполяції N на нуль циклів; k_1 - коефіцієнт пропорційності. Рівняння (1) є розв'язком диференціального рівняння:

$$da = k_1 \cdot a dN. \quad (2)$$

Рішення рівняння (2) з послідовним інтегруванням при проростанні тріщини від її значення при $N = 0$ (фіктивна тріщина розміром a_0) до руйнування при $N = N_f$ (довжина тріщини при руйнуванні зразка - a_f) дозволяє визначити число циклів навантаження до руйнування за залежністю:

$$N_f = \frac{1}{k_1} \ln \left(\frac{a_f}{a_0} \right). \quad (3)$$

Раніше було показано [4], що значення k_1 можуть бути визначеними за параметрами модифікованої кривої втоми: $k_1 = \sigma_a^m \cdot C \cdot \ln \left(\frac{a_f}{a_0} \right)$, де k і C - параметри кривої втоми.

З (3) визначимо, що $k_1 = \frac{1}{N_f} \ln \left(\frac{a_f}{a_0} \right)$ для розрахованої довговічності по кривій втоми N_{f1} на рівні σ_{a1} $N_{f1} = \left(\frac{C}{\sigma_{a1}} \right)^{\frac{1}{k}}$ і розрахованій згідно [5] довговічності до лінії Френча $N_{Fr1} = \left(\frac{C_{Fr}}{\sigma_{a1}} \right)^{\frac{1}{k_{Fr}}} (C_{Fr} \text{ і } k_{Fr} - \text{ параметри кривої втоми за критерієм зародження тріщини, тобто, лінії Френча})$ можна записати два рівняння для k_1 на заданому рівні амплітуди $k_1 = k_{11}$

з різними величинами відношень розмірів тріщин $\ln \left(\frac{a_d}{a_0} \right)$ і $\ln \left(\frac{a_f}{a_0} \right)$. Відношення $\left(\frac{a_d}{a_0} \right)$ відповідає стадії зародження тріщини розміром a_d від поверхні до границі мікроструктурного міцного бар'єру (границя зерна). Прирівнявши k_{11} для N_{Fr1} і N_{f1} , маємо рівняння для визначення початкового дефекту за заданої довговічності:

$$\frac{1}{N_{Fr1}} \ln \left(\frac{a_d}{a_0} \right) = \frac{1}{N_{f1}} \ln \left(\frac{a_f}{a_0} \right). \quad (4)$$

Після перетворень (4) розмір початкового дефекту визначиться наступною залежністю:



$$\ln(a_0) = \left[\ln(a_d) - \frac{N_{Fr1}}{N_{f1}} \cdot \ln(a_f) \right] / \left(1 - \frac{N_{Fr1}}{N_{f1}} \right). \quad (5)$$

Отже, розмір початкового дефекту матеріалу за різних амплітуд напружень може бути розрахований за наявних кривої втоми, лінії Френча і розміру мікроструктурної одиниці матеріалу (розмір зерна, планки бейніту або мартенситу [6]). У роботі [5] одержано наступні рівняння модифікованої кривої втоми і лінії Френча для сталі 34CrMo4 у стані після електрополірування:

$$(\sigma_a - \sigma_d) N^{0,3877} = 23913,88; \quad (6)$$

$$(\sigma_a - \sigma_d) N_{Fr}^{0,2545} = 3477,87, \quad (7)$$

де - $\sigma_d = 0,707\sigma - 1$ – пошкоджуюче напруження у модифікованій кривій втоми [5], $\sigma - 1$ – границя витривалості за симетричного циклу навантаження. У таблиці наведено результати розрахунку значень a_0 для багатоциклової втоми при розмірі мікроструктурної одиниці дослідженої сталі $a_d = 9$ мкм і при $a_f = 1500$ мкм.

Таблиця – Результати визначення розміру початкового дефекту сталі 34CrMo4

σ_a , МПа	N_{Fr} , цикл	N_f , цикл	N_{Fr}/N_f	$\ln(a_0)$	a_0 , мкм
687,09	7383	50002	0,14765	1,31096	3,70975
600	21885	102043	0,21446	0,80043	2,22651
550	48401	171815	0,28170	0,19081	1,21023
500	131005	330310	0,39661	-1,16557	0,31174
462	346341	625289	0,55388	-4,15478	0,01569

Як видно, за зміни напружень від границі витривалості ($\sigma - 1 = 462$ МПа) до рівня напружень малоциклової втоми величина початкового дефекту суттєво змінюється. Така зміна пояснюється особливостями формування субструктури за різних рівнів напружень: високі напруження формують достатньо грубу субструктуру, а низькі – більш тонку.

Висновки. Одержані результати показують можливість визначення початкового дефекту матеріалу, який може бути використаний для розрахунку пошкодження на стадії росту тріщини від a_0 до границі міцного мікроструктурного бар'єру (a_d). Цей результат може бути використаний при вивченні природи втоми матеріалів, пов'язаної з кінетикою формування субструктури. Очевидно, що для практичного використання розробки необхідно розвивати подібний підхід за наявності концентраторів напружень різного рівня.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Polak J. (2005). Plastic strain-controlled short crack growth and fatigue life. *Int. Journ. Fat.*, 27, 1192–1201.
2. Jiša D., Liškutin P., Kruml T., Polak J. (2010). Small fatigue crack growth in aluminium alloy EN-AW 6082/T6. *Int. Journ. Fat.*, Vol. 32., 1913–1920.
3. Цибанєв Г.В. (2013). Застосування деформаційного критерію для опису росту коротких втомних тріщин. *Проблеми міцності*, №1, 43-52.
4. Tsybanev G. V. (2023). Discription of the kinetics of short surface fatigue crack growth using the parameters of fatigue curves. *Strength of Materials*, Vol. 50, No. 2, 308-316.
5. Цибаньов Г.В. (2023). Розрахункове визначення лінії Френча (ЛФ) сталей з використанням експериментальних даних для побудови кривої втоми. *Повідомлення 1. Проблеми міцності*, №3, 48–59.
6. Chapetti M.D. (2003). Fatigue propagation threshold of short cracks under constant amplitude loading. *Int. Journ. Fat.*, Vol. 25, 1319–1326.

