

УДК 539.4

Г. Цибаньов, д. т. н.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка Національної академії наук України

ЗАРОДЖЕННЯ ТРІЩИНИ І ЗМІНА ГРАНИЦІ ВИТРИВАЛОСТІ У ПРОЦЕСІ ВТОМИ СТАЛЕЙ

G. Tsyban'ov, Dr.

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

CRACK INITIATION AND ENDURANCE LIMIT CHANGE IN THE PROCESS OF FATIGUE OF STEELS

Abstract. The previously proposed dependence for the calculated construction of the French line has been adjusted based on the new results. For this purpose a new model of the kinetics of the endurance limit in the process of cyclic loading of steels was developed and used. The obtained results show a satisfactory description of the experiments taken from literary sources. The possibility of using the performed development to determine fatigue damage is shown.

Вступ. Виходячи з інформації в літературних джерелах, моделі підсумовування втомних пошкоджень в матеріалах, запропоновані до теперішнього часу, не можуть урахувати всі чинники, які впливають на довговічність за різних спектрів навантаження. Це пов'язано з використанням в існуючих моделях передумови про єдиний механізм пошкодження матеріалів. В той же час процес утомного пошкодження кожного матеріалу складається зі стадій накопичення пошкоджень, кожна з яких може відбуватися за різними закономірностями. Одним з підходів для описання стадійності втомного пошкодження є описання кінетики зміни однієї з характеристик властивостей матеріалу (пластичність, границя текучості, твердість, границя витривалості, деформаційний параметр границі витривалості) за умов дії змінних амплітуд навантаження. Такий підхід обрано в цьому дослідженні. На відміну від відомих описань зниження границі витривалості за дії змінних амплітуд напружень від його стандартно визначеної величини до критичного значення, припускається наявність більш високого значення цього параметру у непошкодженого матеріалу. Описується кінетика його постійного зниження при циклічному навантаженні за різними залежностями на двох стадіях: від початку навантаження до лінії Френча (ЛФ) [1] і від лінії Френча до руйнування. Для цього початково розглянуто метод побудови ЛФ, який відрізняється від запропонованого в [1].

Розрахунково-експериментальна побудова ЛФ як стадії зародження тріщини втоми. Напрацювання до відмови відповідальних елементів багатьох конструкцій залежить від достовірного прогнозування стадій зародження і росту коротких тріщин втоми, так як ці дві стадії сумарно можуть становити до 90 % від їх повної довговічності. Довговічність до зародження тріщини втоми може бути визначена за різними критеріями. Для цього використовують макроскопічні феноменологічні критерії у вигляді залежності втомної довговічності від напружень, деформацій, енергії циклічного деформування. У зв'язку з відсутністю у цих критеріях параметру розмірності для їх використання необхідно мати методики виявлення і виміру поверхневих тріщин малого розміру. Крім того, що в експериментах на гладких зразках, які зазвичай використовуються як вихідна інформація про втомні властивості матеріалу у вигляді кривих втоми, виникають утруднення з визначенням місця зародження тріщини, її розмір при зародженні визначається методичними можливостями дослідника. У зв'язку з цим наявні у літературних джерелах дані свідчать про широкий діапазон розміру тріщини, прийнятий за момент її зародження, який часто включає як стадію зародження, так і росту короткої тріщини.

Так як осередками зародження тріщин є певні особливості мікроструктури матеріалу такі, як границі зерен полікристала чи пластинчатих структур, неметалеві включення, вторинні фази, розмір тріщини при її зародженні (і відповідна кількість циклів навантаження) має визначатися цим чинником. Для багатьох конструкційних матеріалів це може бути розмір зерна [2, 3]. Допускаючи цю умову та експериментальний метод побудови ЛФ [1], можна прийняти, що ЛФ являє собою криву втоми за критерієм зародження тріщини втоми з розміром мікроструктурного елемента матеріалу.

Для розрахункової побудови ЛФ за даними для кривої втоми у [4] запропонована наступна залежність:

$$N_{inc} = \left(\frac{\sigma_r - \sigma_a}{\sigma_a - \sigma_d} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot N, \quad (1)$$

де N_{inc} – розрахункова кількість циклів навантаження до ЛФ (прийнята як довговічність до зародження тріщини); σ_r – границя витривалості; σ_d – пошкоджуюче напруження (прийнято $\sigma_d = 0,707\sigma_r$ [4]); σ_a – амплітуда напруження; k – показник степеня модифікованої кривої втоми $(\sigma_a - \sigma_d)N^k = C$, C – постійна; N – кількість циклів навантаження до повного руйнування зразка.

Як витікає з (1), за умови $\sigma_a = \sigma_r$ маємо $N_{inc} = N_0$, де N_0 – абсциса зламу кривої втоми (на границі витривалості). Перевірка застосовності залежності (1) для описання експериментальних даних була виконана з використанням даних з прискореної побудови ЛФ [5], де ця умова виконується. Нові результати експериментальної побудови ЛФ (не прискореної), наведені в роботах [6,7] свідчать про те, що лінійна екстраполяція довговічності на рівень $\sigma_a = \sigma_r$ даних для побудови ЛФ суттєво менша у порівнянні з N_0 . У зв'язку з цим виконано корегування залежності (1), яке ґрунтується на виявленій закономірності відхилень розрахункових і експериментальних (N_{ine}) довговічностей до ЛФ. Для цього запропонована модель кінетики зміни границі витривалості у процесі циклічного навантаження (рис.), в якій використано припущення Холдена (Holden J.), Фроста (Frost E.), Іванової В.С. [8] про наявність вихідної границі витривалості зразка перед його циклічним навантаженням σ_{r0} , яка перевищує стандартно визначену σ_r і визначається як напруження переходу від механізму пошкодження багатоциклової втоми до механізму пошкодження малоциклової втоми.

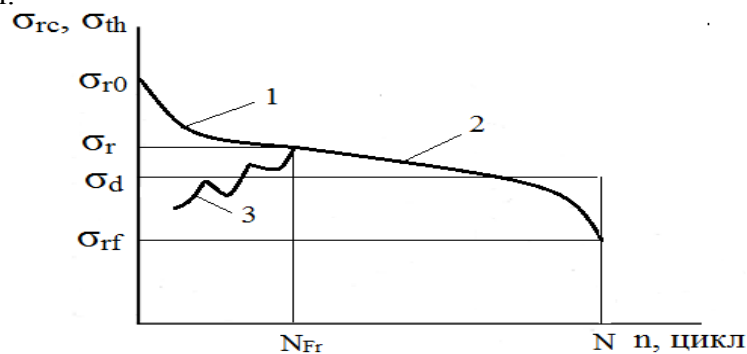


Рис. Кінетика поточної границі витривалості σ_{rc} при навантаженні $\sigma_a > \sigma_r$: 1, 2 – циклічне напрацювання (n) від початку навантаження до ЛФ (N_{Fr}, σ_r) і від ЛФ до руйнування (N, σ_{rf}) відповідно; 3 – зміна граничного напруження σ_{th} при переході через слабкі мікроструктурні бар'єри [9]; σ_{rf} – границя витривалості матеріалу перед руйнуванням за наявності довгої тріщини розміром a_f .

Як видно з рисунка, уявна початкова границя витривалості знижується до σ_r на ЛФ і далі знижується до σ_{rf} при зростанні короткої тріщини. Опис зміни границі витривалості до ЛФ (σ_{rc1}) і після ЛФ (σ_{rc2}) виконано за залежностями:

$$\sigma_{rc1} = \sigma_{r0} \cdot \left(1 - \frac{b_1 n}{N} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad (2)$$

$$\sigma_{rc2} = \sigma_r \cdot \left(c - \frac{b_2 n}{N} \right)^k, \quad (3)$$

де σ_{r0} визначається як σ_a при $N = 5 \cdot 10^4$ цикл [8], постійні b_1, c, b_2 розраховуються, виходячи з граничних умов: $n = 0, n = N_{inc}$ - для b_1 та $n = N_{inc}, n = N$ для c, b_2 .

Коригування довговічностей до ЛФ. Використовуючи запропоновану розрахункову модель та експериментальні дані для побудови ЛФ сталей $\widehat{CSN} 12010$ [6], 34CrMo4 (I), 34CrMo4 (II) [7], виконано коригування довговічностей N_{inc} залежності (1) для розрахункового визначення параметрів ЛФ у вигляді:

$$(\sigma_a - \sigma_d) N_{inc}^{k_{in}} = C_{inc}. \quad (4)$$

Для цього розраховано N_{inc} для рівня $\sigma_a = \sigma_0$ і координати точки перетину розрахункової за (1) і експериментальної ЛФ, визначену за емпіричною залежністю, встановленою для сталей. Результати розрахунку для сталі $\widehat{CSN} 12010$ наведені у наступній таблиці.

Табл. Порівняння розрахункових і експериментальних довговічностей до ЛФ

σ_a , МПа	N , цикл	N_{inc} , цикл	N_{inc} , цикл	Похибка, %
353,01	50000	1539	1619	5,2
269,42	559509	70907	78180	10,26
245,3	1626519	385216	433625	12,66

Як видно з результатів розрахунку, запропонований розрахунково-експериментальний метод побудови ЛФ дозволяє одержувати довговічності до ЛФ, які статистично незначно відрізняються від експериментальних. Подібний результат одержано для сталі 34CrMo4. Цей результат разом з запропонованою моделлю зміни границі витривалості у процесі циклічного навантаження дозволяє надалі розглянути метод підсумовування втомних пошкоджень за змінних амплітуд навантаження. Поточне втомне пошкодження d визначається зміною відносної границі витривалості від початку навантаження зі змінною амплітудою і до руйнування за наведеними вище залежностями на різних рівнях амплітуди напружень:

$$d = \frac{\sigma_{r0} - \sigma_{rc}}{\sigma_{r0} - \sigma_{rf}}. \quad (5)$$

Як видно з (5), поточне пошкодження відслідковує поточну границю витривалості σ_{rc} від σ_{r0} ($d = 0$) до її остаточного значення при руйнуванні σ_{rf} ($d = 1$).

Література.

1. French H. "Fatigue and hardening of steel", *Tr. Amer. Soc. Steel Treat.*, **21**, 899-946, 1933.
2. Chapetti M.D. "Fatigue propagation threshold of short cracks under constant amplitude loading", *Intern. J. Fatigue*, **25**, 1319-1326, 2003.
3. He C. Wu, L. Peng, et al. "Effect of microstructure on small fatigue crack initiation and early propagation behavior in Mg-10Gd-3Y-0.3Zr alloy", *Intern. J. Fat.*, **119**, 311-319, 2019.
4. Цыбанёв Г.В. "Энергетическая трактовка результатов усталостных испытаний и ее использование для определения стадии зарождения трещины", *Пробл. прочности*, №2, 19-27, 1994.
5. Иванова В.С., Марьяновская Т.С., Терентьев В.Ф. "Ускоренный метод построения линии Френча с применением энергетических критериев усталости", *Зав. лаборатория*. №2, 225-228, 1966.
6. Klesnil M., Lukaš P., *Fatigue of Metallic Materials*, Academia, Prague, 1981.
7. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. *Усталость металлов*, Наука, Москва, 2015.
8. Иванова В.С., Терентьев В.Ф., *Природа усталости металлов*, Металлургия, Москва, 1975.
9. Miller K.J. "The two thresholds of the fatigue behaviour", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, **16**, No 9, 931-939 (1993).