

ОПИСАННЯ РОСТУ КОРОТКИХ ПОВЕРХНЕВИХ ТРІЩИН З ВИКОРИСТАННЯМ ПАРАМЕТРІВ КРИВИХ ВТОМИ

Г.В. Цибаньов

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

Using the experimentally established relationship between the parameters of plastic deformation under low-cycle loading and the growth of short surface fatigue cracks, its applicability to high-cycle fatigue is shown. It has been proven and experimentally confirmed that for materials whose inelasticity is lower than the measurement methods used, the parameters of the traditional $\sigma - N$ curve can be used. The transition from plastic strain to force $\sigma - N$ curves was carried out using the Osgood – Ramberg dependence.

Вступ. Відомо, що руйнування матеріалів за дії циклічних навантажень проходить у кілька стадій. Найбільш значну частину втомної довговічності, коли матеріал здатний нести розрахункове навантаження, займають стадії зародження та росту коротких поверхневих тріщин. У залежності від структурного стану матеріалу, рівня навантаження, габаритів конструкції і середовища експлуатації довгі тріщини також можуть бути безпечними, однак для багатьох відповідальних елементів конструкцій двигунів, автомобілів, літаків, трубопроводів наявність довгої тріщини недопустима. У цьому зв'язку дослідження за тематикою прогнозування довговічності матеріалів на стадіях зародження тріщини та її росту за закономірностями короткої тріщини являють собою актуальний напрямок для подальшого розвитку як науки про втому, так і для підвищення надійності і довговічності машин і конструкцій.

Встановлення зв'язку параметрів кривих втоми зі швидкістю росту короткої тріщини втоми. Так як для експериментального дослідження закономірностей зародження і росту коротких тріщин в матеріалах, особливо на гладких поверхнях, необхідно мати специфічне прецизійне обладнання, представляють інтерес методики встановлення взаємозв'язку розміру коротких тріщин з будь-якими іншими, більш доступними для вимірювання, характеристиками для непрямого відслідковування кінетики росту коротких тріщин. Одна з таких методик запропонована і широко апробована в роботах [1, 2, 3]. В області малоциклової втоми авторами встановлений взаємозв'язок між стабілізованими значеннями циклічних пластичних деформацій і розміром поверхневих коротких тріщин у діапазоні їх росту від 10 мкм до 2,0 мм. Одна з передумов, прийнята авторами, базується на одержаному ними експериментальному результаті і передбачає лінійне зростання швидкості росту тріщини втоми (ШРТВ) з її ростом, що відображено залежністю:

$$\frac{da}{dN} = k_1 \cdot a, \quad (1)$$

де a – поточна довжина поверхневої тріщини; N – поточне число циклів навантаження; k_1 – коефіцієнт пропорційності.

Рішенням диференційного рівняння (1) відносно a є вираз:

$$a = a_0 \cdot \exp(k_1 N), \quad (2)$$

де a_0 – довжина поверхневої тріщини при екстраполяції на значення $N=0$.

Важливий результат проведених досліджень [1, 2, 3] для подальшого прогнозування втомної довговічності матеріалів – це встановлення кореляційного зв'язку між коефіцієнтом k_1 і стабілізованими значеннями пластичної деформації за цикл (ширини петлі гістерезиса) ε_{pl} :

$$k_1 = k_\varepsilon \cdot \varepsilon_{pl}^m, \quad (3)$$

де k_ε і m' - експериментально встановлені коефіцієнт і показник степеня рівняння регресії у вигляді степеневі функції (3).

За прийнятими залежностями втомна довговічність зразка до остаточного руйнування N_f (при проростанні тріщини від a_0 до її значення при руйнуванні a_f) визначиться з (1) при рішенні відносно dN з послідуочим інтегруванням:

$$N_f = \frac{1}{k_1} \ln \left(\frac{a_f}{a_0} \right) \quad (4)$$

Підставляючи (3) в (4), записавши довговічність до руйнування з рівняння Кофіна-Менсона і прирівнявши ці довговічності, параметри росту короткої поверхневої тріщини k_ε і m' визначаються за параметрами деформаційної кривої втоми Кофіна-Менсона:

$$m' = \frac{1}{k_m} \quad \text{і} \quad k_\varepsilon = \frac{1}{C_m^{k_m}} \cdot \ln \left(\frac{a_f}{a_0} \right), \quad (5)$$

де k_m і C_m - експериментально визначені показник степеня і постійна рівняння Кофіна-Менсона.

Для визначення величини $\ln \left(\frac{a_f}{a_0} \right)$ в роботі [4] запропонована залежність, яка пов'язана з структурним параметром та коефіцієнтом інтенсивності напружень (КІН) при високій ШРТВ, а також показана можливість застосування такого підходу до визначення втомної довговічності та швидкості росту короткої поверхневої тріщини в області багатоциклової втоми.

Приймаючи до уваги той факт, що пластична (непружна) деформація за багатоциклової втоми спостерігається не для всіх металічних матеріалів [4] і загальноприйнятним при цьому вважається пружне деформування, розглянемо варіант такого матеріалу. Непружну складову діаграми циклічного деформування у відповідності зі степеневою залежністю Рамберга – Осгуда запишемо у вигляді:

$$\varepsilon_{pl} = \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (6)$$

де σ_a - амплітуда циклічного напруження; n', K' - експериментально визначені коефіцієнти циклічного деформаційного зміцнення і циклічної міцності відповідно.

Підставляючи (6) в (3) маємо:

$$k_1 = k_\varepsilon \cdot \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{m'}{n'}} \quad (7)$$

Позначивши $k_\sigma = k_\varepsilon \cdot \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{m'}{n'}}$ і $m = -\frac{m'}{n'}$, коефіцієнт росту тріщини (3) запишемо як:

$$k_1 = k_\sigma \cdot \sigma_a^m \quad (8)$$

Для визначення величин m і k_σ криву втоми приймаємо у вигляді:

$$N_f = \left(\frac{C}{\sigma_a} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (9)$$

Прирівнюємо праві частини цього рівняння і (4) та підставляємо k_1 з (8)

$$\left(\frac{C}{\sigma_a} \right)^{\frac{1}{k}} = \frac{1}{k_\sigma \cdot \sigma_a^m} \ln \left(\frac{a_f}{a_0} \right),$$

звідки маємо:

$$m = \frac{1}{k}; \quad (10) \quad (C)^{\frac{1}{k}} = \frac{1}{k_{\sigma}} \ln\left(\frac{a_f}{a_0}\right); \quad (11) \quad k_{\sigma} = C^{-\frac{1}{k}} \cdot \ln\left(\frac{a_f}{a_0}\right). \quad (12)$$

Як витікає з (9), (11), величини коефіцієнта k_I рівняння (8), який визначає ШРТВ за залежністю (1) та втомну довговічність за залежністю (4), можуть бути розраховані для різних амплітуд напружень за параметрами експериментальної кривої втоми, представленій у напруженнях (9), а не пластичних деформаціях.

Розрахункове визначення кінетики росту тріщин втоми і порівняння з експериментальними даними. Правомірність використання запропонованих залежностей для визначення параметрів ШРТВ перевірена на експериментальних даних робіт [1, 5]. Для цього розрахована кінетика росту і довговічність до зародження короткої поверхневої тріщини певного розміру з використанням залежностей (4), (8). Як видно з рис.1, спостерігається достатньо близьке розрахункове описання експериментальних даних для рівня $\sigma_a = 200$ МПа. Для ще двох рівнів амплітуди напружень дані наведені в таблиці, з яких також витікає тісний збіг результатів експерименту і розрахунку. Такий тісний збіг результатів обумовлений обширними експериментальними даними роботи [1] для визначення співвідношення $\frac{a_f}{a_0}$.

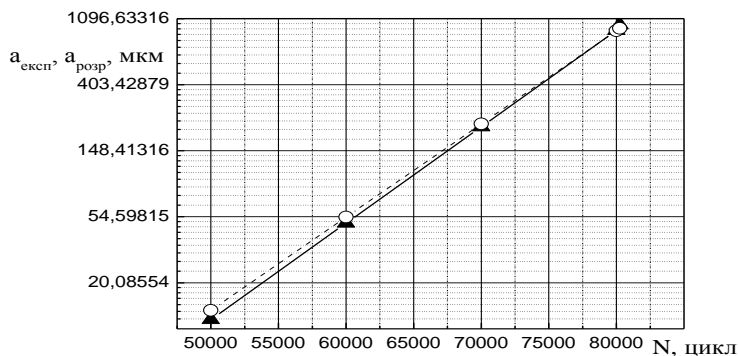


Рис.1 Співставлення розрахункових (▲) і експериментальних (O) розмірів тріщин для рівня амплітуди напружень $\sigma_a=200$ МПа (алюмінієвий сплав EN-AW 6082/T6).

Ці ж залежності (4), (8) використано для побудови кривої втоми за критерієм зародження тріщини розміром 100 мкм в сталях, досліджених в роботі [5] (рис.2).

Таблиця. Розрахункові $a_{розра}$ та експериментальні $a_{експ}$ розміри тріщини

σ_a , МПа	N, N_f , цикл	$a_{експ}$, мкм	$a_{розра}$, мкм	$\frac{a_{експ}}{a_{розра}}$
200	50000	11,51	13,24	0,87
	60000	49,58	54,34	0,91
	70000	213,59	223,02	0,96
	80000	919,33	915,34	1,00
	80250 (N_f)			
250	5000	16,43	16,40	1,002
	8000	46,81	46,67	1,003
	11000	133,36	132,81	1,004
	14000	379,95	377,94	1,005
	17000	1082,52	1075,51	1,006
	17203 (N_f)			
300	400	27,69	27,88	0,99
	800	96,46	97,78	0,98
	1200	336,01	342,94	0,98
	1329 (N_f)			

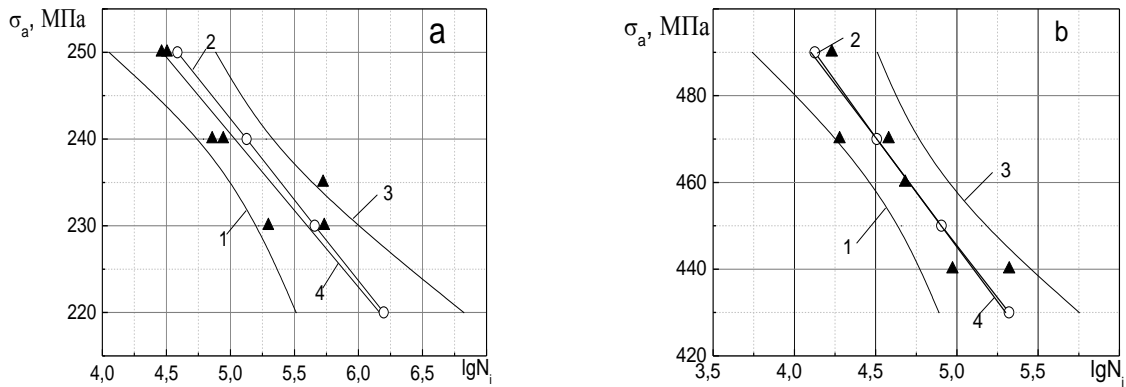


Рис. 2. Розрахункові (2) і експериментальні (4, лінія регресії) криві втоми; 1, 3 – границі довірчого інтервалу лінії 4 на рівні значимості $\alpha=0,05$ (двосторонній критерій); ▲, ○ - експериментальні і розрахункові точки відповідно; а – сталь 45, б – сталь 40Х.

Наведені графіки свідчать про достатньо тісне співпадіння експериментальних і розрахункових розмірів поверхневих тріщин при їх описанні за запропонованим підходом. Слід також зазначити, що таке задовільне описання довговічностей за критерієм зародження короткої тріщини втоми одержано при тому, коли мається значний розкид експериментальних значень як за критерієм зародження короткої тріщини, так і за остаточним руйнуванням зразків. Зважаючи на те, що параметри росту короткої тріщини втоми визначаються за параметрами кривої втоми за критерієм остаточного руйнування, при визначенні останніх до кривих втоми слід застосовувати цензурування вибірок [6] у випадках низьких значень коефіцієнтів кореляції ($R < 0,7$).

Висновок. Запропонований підхід до описання швидкості росту коротких поверхневих тріщин втоми з застосуванням параметрів традиційної кривої втоми в координатах $\sigma_a - N_f$ розширює інформативність таких експериментальних даних, які дозволяють описати кінетику росту коротких поверхневих тріщин та будувати криві втоми за критерієм зародження короткої тріщини заданого розміру. Такий розрахунок кінетики росту тріщини втоми буде практично більш значимим при його застосуванні до конструкційних елементів за наявності градієнтів напружень різного рівня. Крім того, подальшого розвитку потребує встановлення структурного розміру для конкретного матеріалу, відповідального за зародження тріщини при багатоциклової втоми і який відповідає за коректне визначення параметрів швидкості росту тріщин втоми.

Література

1. Jiša D., Liškutin P., Kruml T., Polak J. Small fatigue crack growth in aluminium alloy EN-AW 6082/T6. *International Journal of Fatigue*. 2010. Vol. 32. P. 1913–1920.
2. Polak J., Zezulka P. Short crack growth and fatigue life in austenitic-ferritic duplex stainless steel. *Fatigue Frac. Eng. Mater. Struct.* 2005. Vol. 28. P. 923-935.
3. Polak J. Plastic strain-controlled short crack growth and fatigue life. *International Journal of Fatigue*. 2005. Vol. 27. P. 1192–1201.
4. Цыбанёв Г.В. Применение деформационного критерия для описания роста коротких усталостных трещин. *Пробл. прочности*. 2013. №1. С. 43-52.
5. Драган В.И. Влияние вида напряженного состояния и концентрации напряжений на характеристики сопротивления усталостному разрушению сталей: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.04/ Ин-т проблем прочности АН УССР, Киев, 1982. 226 с.
6. Frank E. Grubbs. Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. *Technometrics*. 1969. Vol. 11, №1. P.1-21.
7. Скрипник В.М., Назин А.Е. Оценка надежности технических систем по цензурированным выборкам: монография. Минск: Наука и техника, 1981. 144 с.