

Рівняння другої ділянки кінетичної діаграми втомного руйнування за різних додатніх асиметрій циклу навантаження

І. С. Піняк

Друга ділянка кінетичної діаграми втомного руйнування при додатніх асиметріях R циклу навантаження за наявності ефекту закриття вістря втомної тріщини описується достовірним рівнянням, при асиметріях R^* циклу за його відсутності – рівнянням Формена. Одержано аналітичну залежність ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_{eff} від номінального розмаху ΔK_R на першій частині другої ділянки кінетичної діаграми втомного руйнування ($\Delta K_{1-2,R} \leq \Delta K_R \leq \Delta K_{fcl,R}$) при різних асиметріях R циклу.

Позначення

R, R^*	– коефіцієнти асиметрії циклу навантаження за наявності та відсутності закриття тріщини (ЗТ) відповідно
da / dN	– швидкість росту втомної тріщини (РВТ)
$(da / dN)_{II}, (da / dN)_{II,R}$	– швидкість РВТ на другій ділянці кінетичної діаграми втомного руйнування (КДВР) за однієї та різних асиметрій циклу
$(da / dN)_1, (da / dN)_2$	– швидкість РВТ відповідно на першій та другій частині другої ділянки КДВР за однієї асиметрії циклу
$(da / dN)_{1,R}, (da / dN)_{2,R}$	– швидкість РВТ відповідно на першій та другій частині другої ділянки КДВР за різних асиметрій циклу
$\Delta K, \Delta K_R$	– розмах коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) в циклі за однієї та різних асиметрій циклу
ΔK_{eff}	– ефективний розмах КІН в циклі
$\Delta K_{fcl}, \Delta K_{fcl,0}, \Delta K_{fcl,R}$	– критичний ефективний розмах КІН в циклі відповідно за однієї, нульової та різних асиметрій циклу
$\Delta K_{eff1-2}, \Delta K_{1-2}, \Delta K_{2-3}$	– ефективний та розмахи КІН в циклі, що відповідають початку та кінцю другої ділянки КДВР
$\Delta K_{1-2,R}, \Delta K_{2-3,R}$	– розмахи КІН, що відповідають початку та кінцю другої ділянки КДВР за різних асиметрій циклу
C_1, C_2, n_1, n_2	– характеристики матеріалу

Вступ. Вплив асиметрії R циклу навантаження на швидкість da / dN росту втомної тріщини аналітично оцінюється найбільш розповсюдженою залежністю Формена [1], визначеною шляхом підстановки в формулу Періса $da / dN = C \Delta K^n$ критичного КІН K_c при статичному навантаженні:

$$da / dN = C \frac{\Delta K^n}{(1 - R)K_c - \Delta K}, \quad (1)$$

де C, n – характеристики матеріалу; ΔK – розмах КІН.

Однак ця залежність фактично не враховує ефект закриття тріщини і тому не може достовірно описати кінетику росту втомної тріщини, що обмежує її застосування. Аналогічні аргументи стосуються залежностей Броека [2] та ін.

У зв'язку з цим у даній роботі запропоновано другу ділянку кінетичної діаграми втомного руйнування описувати за допомогою рівняння, котре враховує ефект закриття тріщини при різних додатніх асиметриях циклу навантаження.

Визначення швидкості росту втомної тріщини при різних додатніх асиметриях циклу. Згідно з роботою [3], швидкість росту втомної тріщини для обох частин другої ділянки КДВР за однієї асиметрії циклу R визначається наступним чином:

$$(da / dN)_{II} = \begin{cases} C_1 \Delta K_{eff}^{n_1} & \text{при } \Delta K_{eff1-2} \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{fcl}; \\ \frac{C_1 \Delta K^{n_2}}{\Delta K_{fcl}^{n_2-n_1}} & \text{при } \Delta K_{fcl} \leq \Delta K \leq \Delta K_{2-3}, \end{cases} \quad (2)$$

де C_1, n_1, n_2 – характеристики матеріалу; ΔK_{eff} – ефективний розмах КІН; ΔK_{fcl} – критичний ефективний розмах КІН, при якому явище закриття тріщини зникає; $\Delta K_{eff1-2}, \Delta K_{1-2}, \Delta K_{2-3}$ – ефективний та розмахи КІН в циклі, що відповідають початку та кінцю другої ділянки КДВР (див. рисунок роботи [3]).

Із рівняння (2) видно, що перша частина другої ділянки КДВР характеризується ефективним розмахом КІН ΔK_{eff} , за допомогою якого достовірно описується кінетика РВТ, друга частина – розмахом КІН ΔK . Однак на практиці користуються характеристикою ΔK , що знижує достовірність результатів дослідження на першій частині ділянки. Отже, необхідно встановити аналітичну залежність між характеристиками тріщиноустійкості ΔK_{eff} та ΔK на першій частині другої ділянки КДВР.

З цією метою розглянемо рисунок, де стрілки вказують на те, що однаковій швидкості РВТ відповідають різні значення ΔK_{eff} і ΔK . Згідно з викладеним вище та рисунком роботи [3], можна записати, що швидкість $(da / dN)_I$ РВТ на першій частині другої ділянки КДВР становить

$$(da/dN)_1 = C_1 \Delta K_{eff}^{n_1} = C_2 \Delta K^{n_2}, \quad (3)$$

де C_2 – характеристики матеріалу.

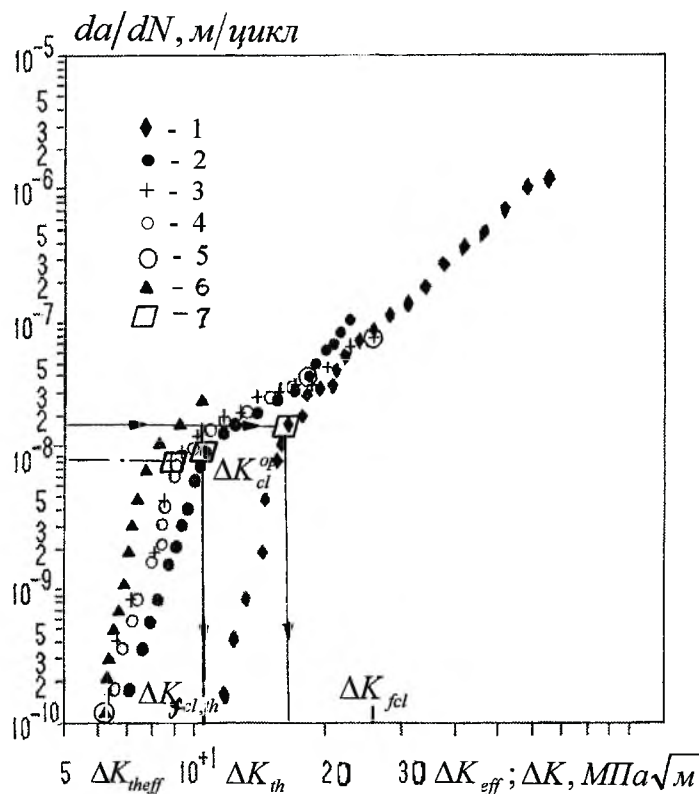
Таким чином, ефективний розмах КІН визначається так:

$$\Delta K_{eff} = \sqrt[n_1]{\frac{C_2 \Delta K^{n_2}}{C_1}}$$

або з урахуванням значення C_2 :

$$\Delta K_{eff} = \sqrt[n_1]{\frac{\Delta K^{n_2}}{\Delta K_{fcl}^{n_2-n_1}}} \quad \text{при} \quad \Delta K_{1-2} \leq \Delta K \leq \Delta K_{fcl}. \quad (4)$$

Експериментальний зв'язок між характеристиками ΔK_{eff} і ΔK встановлено раніше [4].



Залежність швидкості росту втомної тріщини da/dN від ΔK (1, 2, 6) і ΔK_{eff} (3, 4) для сталі 30L-1 при кімнатній температурі та різних асиметриях циклу: 1, 3 – $R=0,1$; 2, 4 – $R=0,6$; 6 – $R=0,7$; 5 – момент зникнення закриття тріщини за досліджуваних асиметрій R циклу (відповідає $\Delta K_{fcl,R}$); 7 – початок другої ділянки КДВР при досліджуваних асиметриях R циклу (відповідає $\Delta K_{1-2,R}$) та при ефективному розмаху КІН (відповідає $\Delta K_{eff,1-2}$).

Розглянемо залежність швидкості $(da/dN)_{II,R}$ РВТ на другій ділянці КДВР від ΔK_{eff} і ΔK для різних асиметрій R циклу.

Із даного рисунка та приведеного в [5] видно, що в межах існування явища закриття тріщини кінетичні діаграми втомного руйнування інваріантні відносно асиметрії R циклу. Отже, перша частина другої ділянки КДВР (див. рисунок роботи [3] та даний) також інваріантна при коефіцієнтах асиметрії R циклу, а швидкість $(da/dN)_{I,R}$ РВТ на ній за різних значень R циклу описується рівнянням

$$(da/dN)_{I,R} = C_1 \Delta K_{eff}^{n_1} \quad \text{при} \quad \Delta K_{eff1-2} \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{fcl,R}. \quad (5)$$

Залежність (5) обмежена зверху критичним ефективним розмахом КІН $\Delta K_{fcl,R}$, який залежить від асиметрії R циклу (рисунок).

Величина критичного ефективного розмаху КІН $\Delta K_{fcl,R}$ при різних додатніх коефіцієнтах асиметрії R циклу визначається експериментально за методикою поточного розкриття вершини тріщини [4, 6–8] на одному зразку і зводиться в таблицю разом з іншими характеристиками тріщиностійкості матеріалу.

Суть методики заключається в тому, що описується кінетика РВТ в координатах $\lg da/dN - \lg \Delta K_{eff}$, $\lg \Delta K$ при $R = 0,01 \dots 0,02$ (краще було б при $R = 0$, але для компактного зразка віднульовий цикл небажаний). Отримані КДВР дозволяють визначити характеристики матеріалу C_1, n_1, n_2 та $\Delta K_{fcl,0}$. За відомою характеристикою $\Delta K_{fcl,0}$ на окремому компактному зразку, підвищуючи по черзі асиметрію R циклу, експериментально визначається $\Delta K_{fcl,R}$, згідно з [4, 8, 9], для кожного коефіцієнта асиметрії R циклу.

Швидкість РВТ на другій частині другої ділянки КДВР $(da/dN)_{2,R}$ при різних асиметріях R циклу описується рівнянням, в яке вже входить характеристика ΔK_R :

$$(da/dN)_{2,R} = \frac{C_1 \Delta K_R^{n_2}}{\Delta K_{fcl,R}^{n_2-n_1}} \quad \text{при} \quad \Delta K_{fcl,R} \leq \Delta K_R \leq \Delta K_{2-3,R}. \quad (6)$$

Таким чином, швидкість РВТ $(da/dN)_{II,R}$ для обох частин другої ділянки КДВР при різних асиметріях R циклу за наявності ефекту закриття вістря втомної тріщини має вигляд

$$(da/dN)_{II,R} = \begin{cases} C_1 \Delta K_{eff}^{n_1} & \text{при} \quad \Delta K_{eff1-2} \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{fcl,R}; \\ \frac{C_1 \Delta K_R^{n_2}}{\Delta K_{fcl,R}^{n_2-n_1}} & \text{при} \quad \Delta K_{fcl,R} \leq \Delta K_R \leq \Delta K_{2-3,R}. \end{cases} \quad (7)$$

Згідно з (4) і рисунком, залежність ефективного розмаху КІН ΔK_{eff} від розмаху КІН ΔK_R й критичного ефективного розмаху КІН $\Delta K_{fcl,R}$ при різних значеннях R за наявності ефекту закриття вістря втомної тріщини запишемо наступним чином:

$$\Delta K_{eff} = n_1 \sqrt{\frac{\Delta K_R^{n_2}}{\Delta K_{fcl,R}^{n_2-n_1}}} \quad \text{при } \Delta K_{1-2,R} \leq \Delta K_R \leq \Delta K_{fcl,R}. \quad (8)$$

Однак представлені на рисунку дані свідчать, що початок другої ділянки КДВР в координатах $\lg da/dN - \lg \Delta K$ (відповідає розмаху КІН $\Delta K_{1-2,R}$) при різних коефіцієнтах R прямує до її початку в координатах $\lg da/dN - \lg \Delta K_{eff}$ (відповідає ΔK_{eff1-2}). Враховуючи це та зручність в користуванні на практиці характеристикою ΔK , а не ΔK_{eff} , рівняння (7) необхідно повністю виразити через розмах КІН ΔK_R . Отже, з урахуванням залежності (8) друга ділянка КДВР при різних значеннях R за наявності ефекту закриття вістря втомної тріщини описується рівнянням

$$(da/dN)_{II,R} = \frac{C_1 \Delta K_R^{n_2}}{\Delta K_{fcl,R}^{n_2-n_1}} \quad \text{при } \Delta K_{1-2,R} \leq \Delta K_R \leq \Delta K_{2-3,R}. \quad (9)$$

Рівняння (7), (9) достовірно описують кінетику росту втомної тріщини при різних додатніх асиметриях R циклу за наявності ефекту закриття вістря втомної тріщини. Рівняння (9) справедливе в межах $\Delta K_{1-2,R} \leq \Delta K_R \leq \Delta K_{2-3,R}$. При асиметриях R^* циклу за відсутності ефекту закриття тріщини можна користуватися залежністю Формена.

Висновки

1. Отримано рівняння, що достовірно описує швидкість росту втомної тріщини на другій ділянці кінетичної діаграми втомного руйнування при різних додатніх асиметриях R циклу за наявності ефекту закриття вістря втомної тріщини.

2. Установлено аналітичну залежність між розмахом КІН ΔK_R та ефективним розмахом КІН ΔK_{eff} на другій ділянці КДВР від її початку до критичного ефективного розмаху КІН $\Delta K_{fcl,R}$ ($\Delta K_{1-2,R} \leq \Delta K_R \leq \Delta K_{fcl,R}$) за різних додатніх асиметрій R циклу.

Резюме

Второй участок кинетической диаграммы усталостного разрушения при положительных асимметриях R цикла нагружения в случае наличия эффекта закрытия вершины усталостной трещины описывается достоверным уравнением, при асимметриях R^* цикла в случае его отсутствия – урав-

нением Формена. Получена аналитическая зависимость эффективного размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_{eff} от номинального размаха ΔK_R на первой части второго участка кинетической диаграммы усталостного разрушения ($\Delta K_{1-2,R} \leq \Delta K_R \leq \Delta K_{fcl,R}$) при разных асимметриях R цикла.

1. *Forman R. C., Keurney V. E., Engle R. M.* Numerical analysis of crack propagation in a cyclic-loaded structures // Trans. ASME. Ser. D. – 1967. – 89, N 3. – P. 459 – 464.
2. *Broek D.* The practical use of fracture mechanics. – London: Kluwer Academic Publishers, 1989. – 522 p.
3. *Пиняк И. С.* О достоверном уравнении второго участка кинетической диаграммы усталостного разрушения // Пробл. прочности. – 1999. – № 3. – С. 83 – 87.
4. *Пиняк И. С.* Влияние закрытия трещины на определяемые характеристики циклической трещиностойкости сталей // Там же. – 1998. – № 2. – С. 161 – 171.
5. *Пиняк И. С.* Текущее значение раскрытия вершины трещины усталости как экспериментально обоснованный критерий ее роста // Там же. – 1998. – № 1. – С. 25 – 33.
6. *А. с. 1670357 СССР МКИ⁵ GO1 B 5/30.* Способ измерения раскрытия трещины на образце / Ю. А. Кашталян, И. С. Пиняк. – Оpubл. 15.08.91, Бюл. № 30.
7. *А. с. 1714427 СССР МКИ⁴ GO1 N 3/32.* Установка для определения характеристик трещиностойкости материалов / И. С. Пиняк, А. В. Наумов, В. М. Морозов. – Оpubл. 23.02.92, Бюл. № 7.
8. *Красовский А. Я., Пиняк И. С.* Описание кинетики роста трещины усталости на основе критерия текущего раскрытия ее вершины // Пробл. прочности. – 1998. – № 4. – С. 60 – 67.
9. *Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении. Методические указания. Сер. Проблемы прочности, долговечности и надежности продукции машиностроения.* – М.: МНТК “Надежность машин”, 1993. – 56 с.

Поступила 17. 05. 99