

Емпіричний розрахунок швидкості росту втомної макротріщини в умовах пружно-пластичного стану матеріалу у її вістрі за широкого діапазону дії різних чинників

І. С. Піняк

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

На основі раніше отриманих автором експериментальних даних емпірично описано швидкість росту короткої і довгої тріщин (макротріщина) за плинності процесу руйнування в часі з урахуванням впливу на нього в широкому діапазоні дії різних чинників та локального опору матеріалу.

Ключові слова: швидкість поширення втомної макротріщини, залишкові стискальні напруження на берегах поблизу вістря тріщини.

Позначення

X, X^*	– чинники, що діють за наявності або відсутності явища закриття тріщини (ЗТ, вістря тріщини)
$\Delta K, \Delta K_X$	– поточний номінальний розмах коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) при дії одного та різних чинників
$\Delta K_{th,eff}, \Delta K_{th}, \Delta K_{th,X}$	– пороговий ефективний і пороговий розмахи КІН при дії одного та різних чинників
$\Delta K_{fc}, \Delta K_{fc,X}$	– критичний розмах КІН при дії одного та різних чинників
$\Delta K_{eff,I,II}$	– ефективний розмах КІН на першій та другій ділянках кінетичної діаграми втомного руйнування (КДВР)
$\Delta K_{eff,1-2}, \Delta K_{1-2,X}, \Delta K_{2-3,X}$	– ефективний розмах і розмахи КІН, що відповідають початку та кінцю другої ділянки КДВР в ефективних і номінальних координатах при дії різних чинників
$\Delta K_{fel,0}, \Delta K_{fel}, \Delta K_{fel,X}$	– критичний ефективний розмах КІН за нульової асиметрії циклу навантаження та дії одного і різних чинників
C_1, n_1, C_{2X}, n_2	– емпіричні параметри конструкційного матеріалу за ефективних і номінальних розмахів КІН
$(da/dN)_{II,X}$	– швидкість росту тріщини на середній ділянці КДВР в широкому діапазоні дії чинників X
$(dc/dN)_X, (da/dN)_X, (dc,a/dN)_X$	– швидкості поширення короткої і довгої макротріщини в широкому діапазоні дії чинників X
$q_{1,I}, q_{2,I}, q_{2,II}$	– натуральні числа степеневі функції в змінній системі координат (показники степені)
$c^{emb,sur}, a$	– довжина короткої (внутрішня, поверхнева) та довгої наскрізної тріщин

Вступ. Відомо близько 100 формул для аналітичного та емпіричного розрахунку швидкості поширення довгої наскрізної тріщини втоми в конст-рукційних матеріалах [1, 2]. Однак їх застосування не дозволяє достовірно описати кінетику росту довгої тріщини (коротка взагалі не розглядається) на всьому інтервалі КДВР за плинності часу з урахуванням впливу як одного, так і різних чинників X у широкому діапазоні їх дії [3, 4] та локального опору матеріалу [5–8].

Відомо, що кінетична діаграма втомного руйнування по осі абсцис обмежена знизу пороговим розмахом КІН $\Delta K_{th,X}$, а зверху – критичним значенням розмаху КІН $\Delta K_{fc,X}$. Складовими КДВР по осі ординат є три ділянки, а саме: дві криволінійні (за низьких $da/dN < 10^{-8}$ м/цикл та високих $da/dN > 10^{-6}$ м/цикл швидкостей росту тріщини) і середня апроксимована прямолінійна (діапазон середніх 10^{-8} м/цикл $\leq da/dN \leq 10^{-6}$ м/цикл швидкостей).

Кінетику росту довгої втомної тріщини на середній ділянці КДВР в широкому діапазоні дії чинників X описано раніше [9, 10]:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{II,X} = \frac{C_1 \Delta K_X^{n_2}}{\Delta K_{fcl,X}^{n_2-n_1}} \quad \text{при} \quad \Delta K_{1-2,X} \leq \Delta K_X \leq \Delta K_{2-3,X}. \quad (1)$$

Співвідношення між параметрами C_1 і C_2 має наступний вигляд:

$$C_{2,X} = \frac{C_1}{\Delta K_{fcl,X}^{n_2-n_1}}, \quad (2)$$

а залежність між ефективним та номінальним розмахами КІН записується так:

$$\Delta K_{eff,II} = n_1 \sqrt{\frac{\Delta K_X^{n_2}}{\Delta K_{fcl,X}^{n_2-n_1}}} \quad \text{при} \quad \Delta K_{1-2,X} \leq \Delta K_X \leq \Delta K_{fcl,X}. \quad (3)$$

Процес руйнування матеріалу елемента умовно можна розділити на три етапи (нано-, мікро- та макрорівні), і кінетика поширення довгої наскрізної тріщини втоми [7] емпірично описується (враховуються закономірності росту тріщини і зміни КДВР від впливу різних чинників та розроблені підходи [3–10]) за плинності часу в широкому діапазоні дії різних чинників. При цьому прийнято, що максимальний розмір нанотріщини є меншим за величину $C \cdot 10^{-6}$ м [11], а мікротріщини – за розмір зерна або фази полікристалічного матеріалу. Поправка на лінійну механіку руйнування [8] відповідає фізично малій (фізично коротка) тріщині [12]. Коротка тріщина, що проростає з поверхні зразка (елемента) як по малій A (у глибину зразка), так і великій B (поперек зразка) осях еліпса [8, 13], досліджується у вигляді пластини [14, 15] згідно з методиками [16–18] або оболонки (зразок на дво-

вісне навантаження). Поверхнева коротка тріщина по великій осі еліпса та довга наскрізна разом становлять макротріщину в елементі. Поверхнева коротка тріщина по малій осі еліпса залишається без змін.

Ріст тріщини на локальному рівні супроводжується наявністю [5, 6] чи відсутністю у її вістрі пластичної зони із залишковими стискальними напруженнями. Відсутність пластичної зони характеризує пружний стан матеріалу у вістрі тріщини (крихке руйнування), в той час як наявність пластичної зони, що обмежена лінійною механікою руйнування, – пружно-пластичний стан матеріалу (квазікрихке руйнування). Поширення зони за прийняте обмеження, а потім на весь нетто-переріз зумовлює пластичний стан матеріалу (в'язке руйнування).

У даній роботі на основі раніше висловлених тлумачень та експериментальних результатів автора з урахуванням виявлених закономірностей поширення тріщини, зміни КДВР [3–10] емпірично описано швидкість росту короткої (по великій осі еліпса) та довгої наскрізної тріщини (макротріщини) за плинності процесу руйнування в часі з урахуванням впливу на нього в широкому діапазоні дії різних чинників та локального опору матеріалу.

Швидкість поширення макротріщини (коротка і довга). Отримані раніше [3–10] дані вказують на те, що поширення довгої втомної тріщини в конструкційному матеріалі протікає за наявності (чинники X) або відсутності (чинники X^*) явища змикання–розмикання її вістря (відповідно за наявності або відсутності залишкових стискальних напружень на берегах поблизу вістря тріщини [5–8]).

Повний обсяг позначень у формулах для розрахунків швидкості росту макротріщини, показників степені, зв'язку між ефективним ΔK_{eff} і номінальним ΔK розмахам КІН та визначення довговічності конструкційного елемента приведено в роботах [3, 6, 7].

Швидкість поширення макротріщини $(dc, da/dN)_X$ (коротка $(dc/dN)_X^{emb, sur}$ та довга $(da/dN)_X$, їх кінетику росту наведено в [8]) з урахуванням у широкому діапазоні дії чинників X у часі описується аналогічно [7]:

$$(dc, da/dN)_X =$$

$$= \begin{cases} \frac{C_1 (\Delta K_{th, X} \Delta K_{fc, X})^{n_2/2}}{\Delta K_{fcl, X}^{n_2-n_1}} + \begin{cases} -(\sqrt{\Delta K_{th, X} \Delta K_{fc, X}} - \Delta K_X^{emb, sur})^{q_{2,I}}, \\ \text{якщо } \Delta K_{th, X}^{emb, sur} \leq \Delta K_X^{emb, sur} \leq \Delta K_{th, X}; \\ -(\sqrt{\Delta K_{th, X} \Delta K_{fc, X}} - \Delta K_X)^{q_{2,I}}, \\ \text{якщо } \Delta K_{th, X} \leq \Delta K_X \leq \Delta K_{1-2, X}; \\ +(\Delta K_X - \sqrt{\Delta K_{th, X} \Delta K_{fc, X}})^{q_{2,III}}, \\ \text{якщо } \Delta K_{2-3, X} \leq \Delta K_X \leq \Delta K_{fc, X}; \end{cases} \\ \frac{C_1 \Delta K_X^{n_2}}{\Delta K_{fcl, X}^{n_2-n_1}}, \text{ якщо } \Delta K_{1-2, X} \leq \Delta K_X \leq \Delta K_{2-3, X} \end{cases} \quad (4)$$

та дії чинників X^* в часі:

$$(dc, da/dN)_{X^*} = \begin{cases} C_2(\Delta K_{th, X^*} \Delta K_{fc, X^*})^{n_2/2} + \begin{cases} -(\sqrt{\Delta K_{th, X^*} \Delta K_{fc, X^*}} - \Delta K_{X^*}^{emb, sur})^{q_{2,I}}, \\ \text{якщо } \Delta K_{th, X^*}^{emb, sur} \leq \Delta K_{X^*}^{emb, sur} \leq \Delta K_{th, X^*}; \\ -(\sqrt{\Delta K_{th, X^*} \Delta K_{fc, X^*}} - \Delta K_{X^*})^{q_{2,I}}, \\ \text{якщо } \Delta K_{th, X^*} \leq \Delta K_{X^*} \leq \Delta K_{1-2, X^*}; \\ +(\Delta K_{X^*} - \sqrt{\Delta K_{th, X^*} \Delta K_{fc, X^*}})^{q_{2,III}}, \\ \text{якщо } \Delta K_{2-3, X^*} \leq \Delta K_{X^*} \leq \Delta K_{fc, X^*}; \end{cases} \\ C_2(\Delta K_{X^*})^{n_2}, \text{ якщо } \Delta K_{1-2, X^*} \leq \Delta K_{X^*} \leq \Delta K_{2-3, X^*}. \end{cases} \quad (5)$$

Показники степені $q_{1,I}$, $q_{2,I}$ та ефективний $\Delta K_{eff, I}$ розмах КІН на першій, а $q_{2,III}$ на третій ділянках КДВР за коефіцієнта пропорційності $A=1$ в точках $\Delta K_{eff, 1-2}$, $\Delta K_{1-2, X}$, $\Delta K_{2-3, X}$, ΔK_{eff} і порівняння швидкостей росту втомної макротріщини за наявності її закриття визначаються згідно з [7]:

$$q_{1,I} = \frac{\lg C_1 + \frac{n_1}{2} \lg \Delta K_{eff, 1-2} + \lg(\Delta K_{fcl, 0}^{n_1/2} - \Delta K_{eff, 1-2}^{n_1/2})}{\lg[(\Delta K_{eff, 1-2} \Delta K_{fcl, 0})^{1/2} - \Delta K_{eff, 1-2}]}; \quad (6)$$

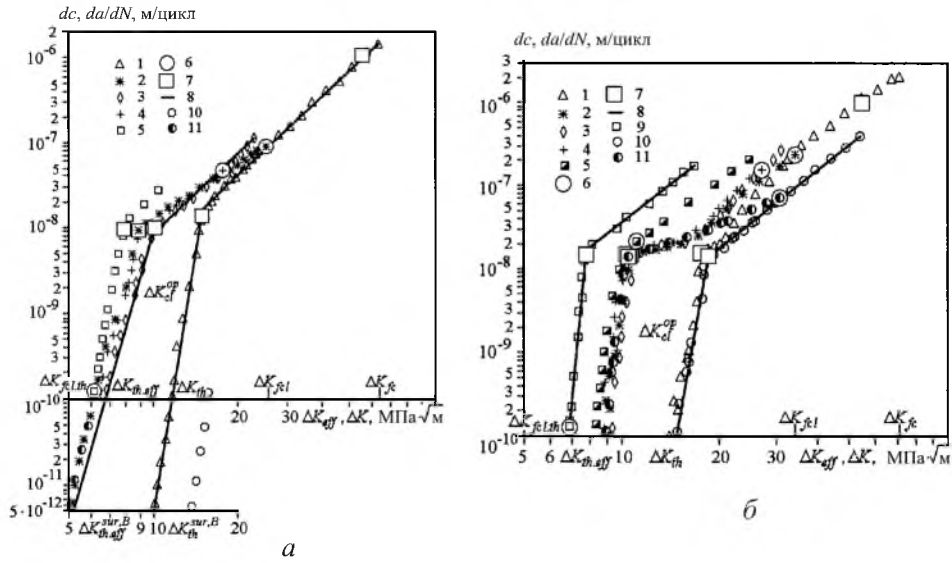
$$q_{2,I} = \frac{\lg C_1 - (n_2 - n_1) \lg \Delta K_{fcl, X} + \lg[(\Delta K_{th, X} \Delta K_{fc, X})^{n_2/2} - \Delta K_{1-2, X}^{n_2}]}{\lg[(\Delta K_{th, X} \Delta K_{fc, X})^{1/2} - \Delta K_{1-2, X}]}; \quad (7)$$

$$q_{2,III} = \frac{\lg C_1 - (n_2 - n_1) \lg \Delta K_{fcl, X} + \lg[\Delta K_{2-3, X}^{n_2} - (\Delta K_{th, X} \Delta K_{fc, X})^{n_2/2}]}{\lg[\Delta K_{2-3, X} - (\Delta K_{th, X} \Delta K_{fc, X})^{1/2}]}; \quad (8)$$

Зв'язок між ефективним ΔK_{eff} та номінальним ΔK розмахом КІН на першій ділянці КДВР має такий вигляд:

$$\Delta K_{eff, I} = (\Delta K_{eff, 1-2} \Delta K_{fcl, 0})^{1/2} - \left\{ [(\Delta K_{th, X} \Delta K_{fc, X})^{1/2} - \Delta K_{X^*}]^{q_{2,I}} + C_1 \left[(\Delta K_{eff, 1-2} \Delta K_{fcl, 0})^{n_1/2} - \frac{(\Delta K_{th, X} \Delta K_{fc, X})^{n_2/2}}{\Delta K_{fcl, X}^{n_2-n_1}} \right]^{1/q_{1,I}} \right\} \quad (9)$$

при $\Delta K_{th, X} \leq \Delta K_{X^*} \leq \Delta K_{1-2, X}$.



Залежність швидкості росту втомної тріщини $dc, da/dN$ від розмаху КІН ΔK (1, 3, 5, 9, 10), ΔK_{eff} (2, 4, 11) для сталей 30Л-1 (а) і D9Н (б) за різних коефіцієнтів асиметрії циклу: 1, 2 – $R = 0,1$; 3, 4 – $R = 0,6$; 5 – $R = 0,7$ (для рисунка, б $R = 0,65$); 9 – $R = 0,75$; 10, 11 – $R = -1,0$ в умовах кімнатної температури (для рисунка, б: 10, 11 – $R = 0,1$ при $T = 213$ К); 6 – межі закриття тріщини (верхня межа $\Delta K_{fcl, X}$ локального критерію росту довгої втомної тріщини); 7 – границі другої ділянки КДВР за різних асиметрій; 8 – емпіричні залежності $dc, da/dN = f(\Delta K)$ відповідно при $R = 0,1$ і $0,6$ (для рисунка, а) та за $R = 0,1$ ($T = 213$ К) і $0,75$ (для рисунка, б).

(У роботі [7] у формулі (7) допущено помилку. Замість показників степені q_1, q_2 слід читати $q_{1, I}, q_{2, I}$.)

Показники степені $q_{2, I}$ і $q_{2, III}$ на першій та третій ділянках КДВР за коефіцієнта пропорційності $A = 1$ в точках $\Delta K_{1-2, X}$, $\Delta K_{2-3, X}$ і порівняння швидкостей росту втомної макротріщини за відсутності її закриття (чинники X^*) визначаються аналогічно [7]:

$$q_{2, I}^* = \frac{\lg C_2 + \lg[(\Delta K_{th, X^*} \Delta K_{fc, X^*})^{n_2/2} - \Delta K_{1-2, X^*}^{n_2}]}{\lg[(\Delta K_{th, X^*} \Delta K_{fc, X^*})^{1/2} - \Delta K_{1-2, X^*}]}; \quad (10)$$

$$q_{2, III}^* = \frac{\lg C_2 + \lg[\Delta K_{2-3, X^*} - (\Delta K_{th, X^*} \Delta K_{fc, X^*})^{n_2/2}]}{\lg[\Delta K_{2-3, X^*} - (\Delta K_{th, X^*} \Delta K_{fc, X^*})^{1/2}]}; \quad (11)$$

Верхня межа поширення макротріщини за наявності її закриття визначається так:

$$\Delta K_{fcl, X} = n_2 - n_1 \sqrt{\frac{C_1}{C_{2, X}}}. \quad (12)$$

На рисунку приведено експериментальні й емпіричні КДВР сталей 30Л-1 та Д9Н за асиметрій циклу $R = -1 \dots 0,75$, температур $T = 293$ і 213 К та частоти навантаження $f = 15$ Гц. Емпіричні залежності $dc, da/dN = f(\Delta K)$ нанесено суцільними лініями для макротріщини (рисунок, а) та довгої наскрізної втомної тріщини (рисунок, б). За наявності локальних аномалій на номінальних КДВР (впадина) розрахунок швидкості росту втомної тріщини потрібно проводити по КДВР, що відображає умови роботи конструкційного матеріалу, для яких він створений (для сталі Д9Н – це низькі кліматичні температури, рисунок, б).

Емпіричні формули, виведені на основі отриманих раніше автором експериментальних даних, відображені у вигляді КДВР за різних асиметрій циклу навантаження [19], низьких [6] і підвищених температур [20], аналізу зміни закономірностей КДВР [4] та верхньої межі $\Delta K_{fcl, X}$ локального критерію росту довгої втомної тріщини ($\Delta K_{fcl, th, X} \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{fcl, X}$) в двох системах координат: існуючій та зміщеній [3].

Оскільки емпіричний опис швидкості поширення втомної тріщини проводився з позиції аналізу зміщення верхньої межі $\Delta K_{fcl, X}$ локального критерію, яка не визначалася ні нашими, ні зарубіжними авторами, порівняння експериментальних та емпіричних КДВР виконано лише з урахуванням власного експерименту.

Висновок. Наведено розрахунок швидкості росту короткої та довгої наскрізної тріщини за плинності процесу руйнування в часі з урахуванням впливу на нього в широкому діапазоні дії різних чинників.

Резюме

На основе экспериментальных данных автора аналитически описано скорость роста короткой и длинной трещин (макротрещина) в течение времени процесса разрушения с учетом влияния на него в широком диапазоне действия различных факторов.

1. *Tot L. and Krasovsky A. J.* Material characterization for the reliability assessment of cyclically loaded engineering structures // Reliability Assessment of Cyclically Loaded Engineering Structures / R. A. Smith (Ed.). – London: Kluwer Academic Publishers. – 1997. – Vol. 39. – P. 225 – 272.
2. *Ярема С. Я.* Методология определения характеристик сопротивления развитию трещин (трещиностойкости) материалов при циклическом нагружении // Физ.-хим. механика материалов. – 1981. – № 4. – С. 100 – 110.
3. *Пиняк И. С.* Аналитическое описание скорости роста усталостной трещины в металлах при различных асимметриях цикла нагружения // Пробл. прочности. – 2001. – № 5. – С. 111 – 119.
4. *Красовский А. Я., Пиняк И. С.* Аналитическое описание скорости роста усталостной макротрещины в металлах при различных условиях их эксплуатации // Праці IV Міжнар. симп. з трибофатики (ISTF 4). – Тернопіль, 2002. – Т.1. – С. 284 – 289.

5. Піняк І. С. Микро- и макроскорость роста усталостной трещины в сталях и сплавах под влиянием закрытия трещины // Пробл. прочности. – 2002. – № 1. – С. 88 – 101.
6. Піняк І. С. Вязкохрупкий перехід в хладноломких металах при многоцикловом нагріванні // Там же. – № 5. – С. 53 – 69.
7. Піняк І. С. К оценке кинетики упругопластического роста сквозной усталостной макротрещины в металах при экстремальных и естественных условиях эксплуатации // Там же. – 2004. – № 2. – С. 130 – 143.
8. Піняк І. С. Оцінка стану елемента з тріщиною на основі двохпараметричного підходу до його розрахунку на міцність в умовах пружно-пластичного руйнування // Праці III Міжнар. конф. “Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій”. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2004. – С. 159 – 165.
9. Піняк І. С. О достоверном уравнении второго участка кинетической диаграммы усталостного разрушения // Пробл. прочности. – 1999. – № 3. – С. 83 – 87.
10. Піняк І. С. Рівняння другої ділянки кінетичної діаграми втомного руйнування за різних додатніх асиметрій циклу навантаження // Там же. – 2000. – № 2. – С. 75 – 80.
11. Гузь А. Н., Руцицкий Я. Я. Наноматериалы. О механике наноматериалов // Прикл. механика. – 2003. – 39, № 11. – С. 36 – 69.
12. Міллер К. Дж. Втома металів: минуле, сучасне та майбутнє. 27 лекція на честь Джона Плеєра // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1991. – № 5. – С. 9 – 26.
13. Піняк І. С. Багатоциклове втомне руйнування конструкційних матеріалів при їх пружно-пластичному деформуванні // Праці XIII Міжнар. кол. “Механічна втома металів” (МВМ-2006). – Тернопіль: Терн. держ. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. – Тернопіль, 2006. – С. 400 – 406.
14. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений*. В 2 т. / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 1016 с.
15. *Патент 17876 Україна*, МПК 7 G01N1/00, G01N3/32. Зразок для дослідження циклічної тріщиностійкості матеріалів / Б. О. Грязнов, І. С. Піняк. – Чинний з 16.10.06. Бюл. № 10.
16. *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.
17. Піняк І. С. Методологія вивчення закономірностей поширення втомної тріщини за критерієм росту – поточним і обмеженим ефективним розмахом КІН // Вибрації в техніці і технологіях. – 2001. – № 5. – С. 50 – 53.
18. Красовський А. Я., Піняк І. С. Метод поточного розкриття вістря тріщини в умовах циклічного навантаження // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 12 – 27.

19. *Піняк І. С.* Вплив явища закриття вістря втомної тріщини на асиметрії циклу навантаження та пороги тріщиностійкості // Там же. – 2000. – № 6. – С. 106 – 114.
20. *Піняк І. С.* Циклічна тріщиностійкість зварного шва сталі 08X18H10T трубопроводів АЕС після 100000 годин експлуатації // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2007. – Вип. 29. – С. 114 – 118.

Поступила 06. 09. 2004