



УДК 539.375;539.4:536.543

© 2011

Член-кореспондент НАН України **О. Є. Андрейків, І. Я. Долінська**

## **Вплив високотемпературної повзучості на зародження втомних тріщин у тілах біля концентраторів напружень**

*Побудовано розрахункову модель для оцінки періоду зародження повзучо-втомної тріщини. Наведено приклад розрахунку періоду зародження повзучо-втомної тріщини, а також показано, що чим більший період циклу навантаження  $T$ , тим відчутніший вплив повзучості  $i$ , відповідно, менший період зародження тріщини.*

У тепловій і атомній енергетиці, хімічній і нафтохімічній промисловості багато елементів конструкцій працюють в умовах дії високих температур і змінного в часі навантаження. Для запобігання непередбаченого їх руйнування і аварійних ситуацій важливе значення має коректність і надійність підходів для визначення їх залишкового ресурсу. Особливо це стосується випадків при циклічному навантаженні з різними витримками в умовах дії високих температур, коли реалізується явище високотемпературної повзучості. Як відомо [1–5], в механіці руйнування довговічність елементів конструкцій при змінних навантаженнях складається з двох періодів: періоду зародження та періоду докритичного росту втомної тріщини (залишкова довговічність).

На даний час визначенню залишкової довговічності елементів конструкцій при високих температурах присвячено багато робіт, результати яких узагальнені в [6]. Досліджень із визначення періоду зародження повзучо-втомної тріщини, які б базувалися на фізичних законах або законах механіки руйнування, досить мало, в основному це експериментальні дослідження при відсутності концентраторів напружень [7, 8].

На даний час уже побудовано ряд розрахункових моделей для визначення періоду зародження втомних тріщин біля концентраторів напружень при звичайних температурах [1, 2, 5, 9–11]. Однак при наявності високих температур, коли має місце високотемпературна повзучість і циклічний розтяг з різними витримками, таких досліджень недостатньо. Саме розгляду таких задач і присвячена дана робота.

**Постановка задачі і метод її розв'язання.** Розглянемо пластину, послаблену вирізом з радіусом заокруглення у вершині  $r$  (рис. 1), яка піддається дії циклічного навантаження з амплітудою  $p$  при високій температурі, що викликає в зоні передруйнування високотемпературну повзучість (див. рис. 1). Вважатимемо, що навантаження змінюється в часі, як показано на рис. 2. Задача полягає у визначенні кількості циклів навантаження  $N = N_3$ , по досягненню яких на поверхні концентратора утвориться повзучо-втомна макротріщина.

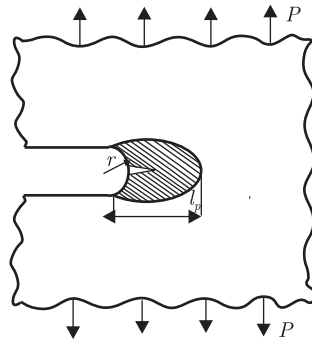


Рис. 1. Схема навантаження пластини з концентратором

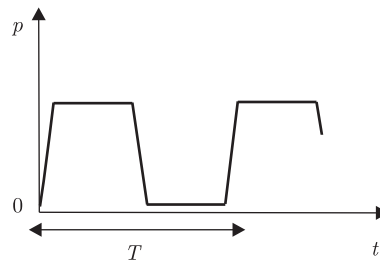


Рис. 2. Графік зміни в часі зовнішнього навантаження

При розв'язуванні даної задачі будемо виходити з таких міркувань. Під дією прикладених навантажень біля концентратора буде виникати пластична зона — зона передруйнування (заштрихована область на рис. 1) довжиною  $l_p$ , яка і буде місцем зародження повзучо-втомної тріщини.

Аналогічно [1], як і при звичайних температурах, можна припустити, що інтенсивність проходження в області передруйнування процесів накопичення і зародження втомних пошкоджень повністю контролюється максимальним амплітудним значенням деформації розтягу  $\varepsilon_{\max}$  в цій області. Оскільки для макротріщини деформація  $\varepsilon_{\max}$  у зоні передруйнування біля її вершини пропорційна її розкриттю  $\delta_{\max}$  [1], можна записати

$$\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{fC}} = \frac{\delta_{\max}}{\delta_{fC}}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_{fC}$ ,  $\delta_{fC}$  — відповідно критичні значення деформації  $\varepsilon_{\max}$  та розкриття  $\delta_{\max}$ , які відповідають спонтанному руйнуванню матеріалу.

Аналогічно [1], вважатимемо, що зародження повзучо-втомної тріщини проходить неперервно з нульової довжини і характеризується її змінною швидкістю  $V$ , яка є функцією максимальної величини деформації розтягу  $\varepsilon_{\max}$  за цикл в зоні передруйнування, тобто

$$V = \frac{dl}{dN} = \Phi^{-1}(\lambda), \quad (2)$$

де  $\Phi(\lambda)$  — характеристична функція втомного руйнування, величина якої обернена до швидкості росту повзучо-втомної тріщини; параметр  $\lambda$  запишемо у вигляді

$$\lambda = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{fC}}}. \quad (3)$$

Разом з тим приймаємо, як і в [1], що швидкість зародження тріщини довжиною  $l$  буде така ж, що і у випадку її поширення при тій же величині максимальної амплітуди деформації  $\varepsilon_{\max}$  в зоні переддруїнування. Враховуючи це і результати роботи [3], для визначення  $V$  можна записати таке рівняння:

$$V = \frac{dl}{dN} = \left[ \varepsilon_{\max} \varepsilon_{fC}^{-1} K_{fC}^2 \sigma_{of}^{-1} E^{-1} + A \left[ \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{fC}} \right]^m \ln \left( \frac{1+T}{t_1} \right) \right]^2 \times \alpha E^2 \cdot 4,5^{-1} (K_{fC}^2 - \varepsilon_{\max} \varepsilon_{fC}^{-1} K_{fC}^2)^{-1}, \quad (4)$$

де  $\sigma_{of}$  — усереднені напруження в зоні переддруїнування;  $\alpha$  — коефіцієнт, що пов'язує статичне і циклічне розкриття тріщини;  $E$  — модуль пружності;  $A$ ,  $t_1$ ,  $m$  — константи, які характеризують першу ділянку повзучості [3] і визначаються з експерименту;  $T$  — період циклу навантаження;  $K_{fC}$  — критичне значення коефіцієнта  $K_{I\max}$  інтенсивності напружень (КІН).

Внаслідок згаданого вище припущення співвідношення (2), (3) описують і процес зародження тріщини, якщо тільки під  $l$  розуміти її довжину, а під  $\varepsilon_{\max}$  — деформацію в її вершині з врахуванням концентратора. В такому випадку початкова умова для рівняння (2) матиме вигляд  $l = 0$  при  $N = 0$ , тобто в початковому стані тріщина відсутня. Кінцева умова визначається тим, що при  $N = N_3$  зароджена тріщина досягає такої довжини  $l = l_3$ , для якої виконуються умови автомодельності, тобто тріщина вважається макроскопічною [1].

Інтегруючи рівняння (2) з урахуванням попереднього і результатів [1], отримуємо таку формулу для визначення періоду зародження макротріщини:

$$N_3 = \int_0^{l_p} \Phi(\lambda) dl. \quad (5)$$

Величину деформації  $\varepsilon_{\max}$  у вершині тріщини, яка входить у формулу (3), визначаємо на основі [1] у такому вигляді:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon_{fC} K_{IP}^2 l + \varepsilon_0 K_{fC}^2 (l_p - l)}{K_{fC}^2 l_p}, \quad (6)$$

де  $K_{IP}$  — максимальне значення КІН для тріщини довжиною  $l = l_p$ ;  $\varepsilon_0$  — максимальна величина деформації біля концентратора в початковому стані, яка визначається формулою [5]

$$\varepsilon_0 = \left\{ 1 + \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right\}^{-1/2} \left( \frac{K_{I\max}}{K_{fC}} \right)^2 \varepsilon_{fC}, \quad r_0 = \frac{4K_{fC}^2}{\pi E \sigma_{of} \varepsilon_{fC}}. \quad (7)$$

Тут  $r$  — радіус кривизни концентратора;  $K_{I\max}$  — максимальне значення КІН за цикл.

Порівнюючи (4) і (2), запишемо  $\Phi(\lambda)$  у вигляді

$$\Phi(\lambda) = \frac{4,5(K_{fC}^2 - \varepsilon_{\max} \varepsilon_{fC}^{-1} K_{fC}^2)}{\alpha E^2} \left[ \varepsilon_{\max} \varepsilon_{fC}^{-1} K_{fC}^2 \sigma_{of}^{-1} E^{-1} + A \left[ \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{fC}} \right]^m \ln \left( \frac{1+T}{t_1} \right) \right]^{-2}. \quad (8)$$

Отже, в даному випадку формулу (5) запишемо таким чином:

$$N_3 = \int_0^{l_p} \frac{4,5(K_{fC}^2 - \varepsilon_{\max} \varepsilon_{fC}^{-1} K_{fC}^2)}{\alpha E^2} \left[ \varepsilon_{\max} \varepsilon_{fC}^{-1} K_{fC}^2 \sigma_{of}^{-1} E^{-1} + A \left[ \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{fC}} \right]^m \ln \left( \frac{1+T}{t_1} \right) \right]^{-2} dl. \quad (9)$$

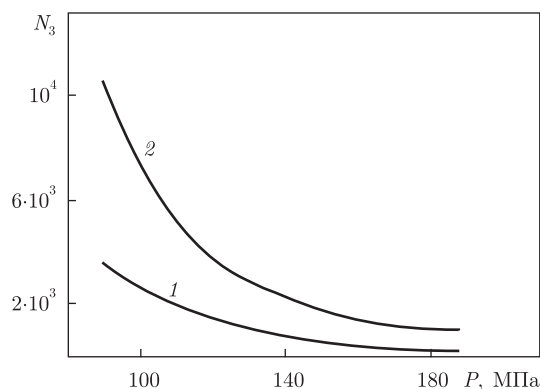


Рис. 3. Залежність періоду зародження повзучо-втомної тріщини  $N_3$  від навантаження  $P$  (крива 1 — радіус кривизни 3,75 мм, крива 2 — 2 мм)

Відповідно, якщо для конкретно розглянутого випадку визначені величини  $r$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $K_{IP}$ , а також експериментально встановлені значення параметрів  $A$ ,  $t_1$ ,  $m$ ,  $K_{fC}$ , то тривалість періоду зародження повзучо-втомної тріщини визначається з рівняння (9).

Приклад. Розглянемо пластину зі сталі 321 з двосторонніми симетричними крайовими надрізами, яка навантажена циклічно з амплітудою  $p$  при високій температурі, що викликає в зоні передруйнування високотемпературну повзучість. Задача полягає у знаходженні кількості циклів навантаження  $N = N_3$ , з досягненням якої на поверхні надрізу зародиться повзучо-втомна тріщина. Розв'язок такої задачі шукатимемо, використовуючи рівняння (9) та співвідношення (6), (7). У нашому випадку  $K_{I \max}$  запишемо у вигляді [5]:

$$K_{I \max} = \frac{P\sqrt{\pi l}f(l/L)}{\sqrt{1-l/L}};$$

$$f\left(\frac{l}{L}\right) = 1,222\left(1 - 0,5\frac{l}{L}\right) - 0,015\left(\frac{l}{L}\right)^2 + 0,091\left(\frac{l}{L}\right)^3,$$

де  $l$  — глибина надрізів;  $L$  — півширина пластини.

Для тріщини, що виходить із вершини крайового симетричного надрізу, коефіцієнт інтенсивності напружень запишемо у вигляді [12]:

$$K_{IP} = 1,1215P\sqrt{\pi(b+l)}s\left\{1 + \left[(\alpha_0 - 1)^{-2,5} + \left(\frac{1}{s} - 1\right)^{-2,5}\right]^{-0,4}\right\}, \quad (10)$$

де  $s = \sqrt{l/(b+l)}$ ,  $\alpha_0 = 2K_{I \max}/(\sqrt{\pi r}P)$  — коефіцієнт концентрації напружень у вершині надрізу при відсутності тріщини.

На основі експериментальних даних для втоми [4] знаходимо коефіцієнт  $\alpha$ , який дорівнює 0,002. Далі з експерименту на втому з повзучістю визначаємо константи  $A = 0,5 \cdot 10^{-5}$ ,  $m = 0,8$ ,  $t_1 = 0,9 \cdot 10^{-8}$ .

На рис. 3 наведено залежність  $N_3$  періоду зародження тріщини від навантаження  $P$ , де розрахунки проводили для таких значень параметрів:  $E = 1,9 \cdot 10^5$  МПа,  $\sigma_t = 450$  МПа,  $K_{fC} = 100$  МПа $\sqrt{m}$ ,  $\varepsilon_{fC} = 0,597$ ,  $T = 12h$ . Ці дані використані також при побудові залежності зміни періоду зародження тріщини  $N_3$  від періоду циклу  $T$  при різних значеннях  $P$  (рис. 4).

Одержані графічні залежності свідчать про необхідність врахування повзучості при визначенні періоду зародження повзучо-втомних тріщин.

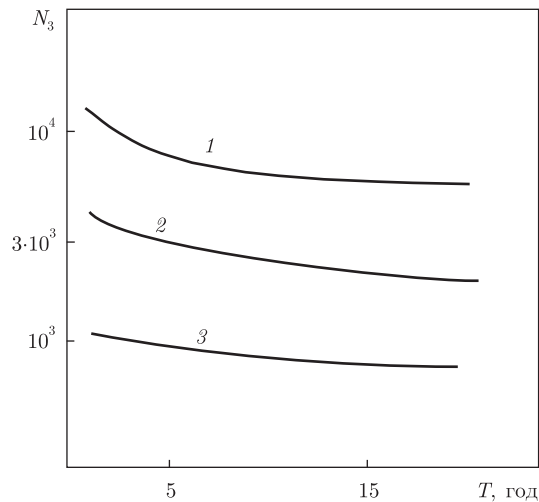


Рис. 4. Залежність періоду зародження повзучо-втомної тріщини  $N_3$  від періоду циклу  $T$  (крива 1 — при  $P = 90$  МПа; крива 2 — при  $P = 130$  МПа; крива 3 — при  $P = 170$  МПа)

Таким чином, на основі деформаційного підходу побудовано кінетичне рівняння для визначення тривалості періоду зародження тріщини в елементах конструкцій при втомі і високотемпературній повзучості. За допомогою цього рівняння вдалось показати, що чим більший період витримки циклу навантаження, тим відчутніший вплив повзучості і, відповідно, менший період зародження тріщини.

1. *Андрейкив А. Е.* Пространственные задачи теории трещин. — Киев: Наук. думка, 1982. — 245 с.
2. *Андрейкив А. Е., Дарчук А. И.* Усталостное разрушение и долговечность конструкций. — Киев: Наук. думка, 1992. — 134 с.
3. *Андрейкив О. Є., Лесів Р. М., Долінська І. Я.* Залежність періоду докритичного росту повзучо-втомної тріщини від періоду циклу навантаження // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2009. — № 4. — С. 31–38.
4. *Gladwin D. N., Miller D. A., Neate G. J., Priest R. H.* Creep, fatigue and creep-fatigue crack growth rates in parent and simulated HAZ type 321 stainless steel // Fatigue and Fract. Eng. Mater. and Struct. — 1988. — **11**, No 5. — P. 35.
5. *Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Партон В. З.* Механика разрушения и прочность материалов. Т. 1. — Киев: Наук. думка, 1988. — 488 с.
6. *Andreikiv O. E., Lesiv R. M., Levyts'ka N. M.* Crack growth in structural materials under the combined action of fatigue and creep (review) // Materials Science. — 2009. — **45**, No 1. — P. 1–17.
7. *Schijve S.* Fatigue of Structures and Materials in the State of the Art // Proc. of the ECF14. — 2002. — **3**. — P. 211–262.
8. *Handbook of fatigue of crack propagation in metallic structures / Edited by A. Carpinteri.* — Amsterdam: Elsevier, 1994. — Vol. 1. — 952 p.
9. *Андрейкив А. Е.* Расчетная модель для определения периода зарождения усталостной макротрещины // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 1976. — № 6. — С. 27–31.
10. *Панасюк В. В., Остап О. П., Костык Е. М.* Зарождение усталостных трещин концентратора напряжений // Там же. — 1985. — № 6. — С. 3–10.
11. *Стадник М. М., Ризничук Р. В.* Расчетная модель для определения усталостной долговечности тела, ослабленного тонкой полостью // Там же. — 1989. — № 3. — С. 83–88.
12. *Саврук М. П.* Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. — Киев: Наук. думка, — 1988. — 620 с.

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **O. Ye. Andreikiv, I. Ya. Dolins'ka**

**The influence of high-temperature creep on the fatigue crack initiation in solids near stress concentrators**

*The calculation model for the estimation of a period of creeping-fatigue crack initiation is developed. The example of the calculation of this period is given. It is shown that the greater the loading cycle period, the more perceptible the influence of creep and, accordingly, the less the period of crack initiation.*