УДК: 539.375: 539.4: 536.543

О. Є. Андрейків[1], В. Р. Скальський[2], В. К. Опанасович[2], І. Я. Долінська[2], І. П. Штойко[1]

ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДУ ДОКРИТИЧНОГО РОСТУ ПОВЗУЧО-ВТОМНИХ ТРІЩИН ЗА БЛОЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Сформульовано математичну модель для дослідження процесів поширення повзучо-втомних тріщин у пластинах за блочного навантаження. Досліджено вплив форми блоків навантаження на довговічність елементів конструкцій. Визначено докритичний ріст повзучо-втомних тріщин у тонкостінних елементах конструкцій.

Проблема надійності та довговічності елементів конструкцій тривалого експлуатування має особливо важливе наукове та прикладне значення у різних галузях промисловості. Для оцінки їхнього ресурсу необхідно враховувати появу в матеріалі дефектів типу тріщин (втомних тріщин) і розвитку останніх.

У випадку регулярного навантаження теорія втомного руйнування на сьогодні вивчена досить детально як в експериментальному, так і в теоретичному моделюванні цього явища [1, 7, 11, 12]. Однак при експлуатації елементи конструкцій зазнають складних режимів навантаження, у тому числі й блочного. На сьогодні побудовано низку розрахункових моделей для дослідження росту втомних тріщин у циклі блочного навантаження [4, 5, 12, 13]. Проте вплив високих температур, коли виникає високотемпературна повзучість і є циклічний розтяг з різними витримками в циклі блоку, вивчений недостатньо.

Метою роботи є дослідити ріст повзучо-втомних тріщин в умовах дії блочного навантаження і розробити на цій основі ефективний метод прогнозування залишкової довговічності елементів конструкцій з дефектами типу тріщин.

Постановка задачі і метод її розв’язання. Розглянемо нескінченну пластину, послаблену прямолінійною тріщиною початкової довжини $2\ell_0$, яка нагріта до високої температури T_0, що викликає в зоні передруйнування високотемпературну повзучість, а в нескінченно віддалених точках піддана блочному навантаженню, що описується функцією $F(t)$. Вважаємо, що зусилля блоку навантаження напрямлені перпендикулярно до лінії розміщення тріщини і змінюються з часом t як блочні навантаження.

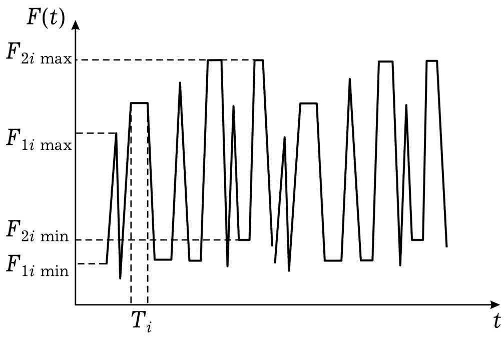


Рис. 1

При цьому блок $F(t)$ складається із двох типів зусиль: $F_1(t)$ має n піків без витримки, а блок $F_2(t)$ має k піків з витримкою T_i, $i = 1, 2\ldots, k$ (див. рис. 1).

У розглядуваному випадку приймаємо, що тріщина є макроскопічною, а напружено-деформований стан симетричний і описується в околі її вершини тільки коефіцієнтом інтенсивності напружень K_I.

Задача полягає у визначенні кількості блоків навантаження $N = N_*$, коли в результаті повзучо-втомного руйнування тріщина підросте до критичного розміру ℓ_*, і пластина зруйнується.

Вважаючи процес росту тріщини неперервним, енергетичний баланс цього процесу для кожного моменту часу t запишемо у вигляді [2, 9]

$$A = W + \Gamma + Q + K\,, \tag{1}$$

де A − робота зовнішніх сил; Γ − енергія руйнування тіла; Q − величина виділеної теплової енергії під час руйнування пластини, яка є сталою за високої температури; K − кінетична енергія, яка в розглядуваному випадку буде малою величиною; W − енергія деформування пластини після просування тріщини на величину $\Delta\ell$, яку подамо як

$$W = W_{\mathrm{e}} + W_{\mathrm{p}}^{(1)}(\ell) - W_{\mathrm{p}}^{(2)}(t)\,. \tag{2}$$

Тут W_{e} − пружна складова W; $W_{\mathrm{p}}^{(1)}(\ell)$ − частина роботи пластичних деформацій у зоні передруйнування за розтягу від зусиль $F(t)$, яка залежить тільки від довжини тріщини ℓ; $W_{\mathrm{p}}^{(2)}(t)$ − частина роботи пластичних деформацій при розвантаженні тіла в блоці і стиску зони передруйнування, яка залежить тільки від часу t (власне, від кількості блоків навантаження $N = t/T_n$, де T_n − тривалість одного блоку навантаження), і генерується самою пластиною.

Оскільки виконується умова (1) балансу енергій, то буде виконуватись і умова балансу швидкостей їх зміни. З огляду на це, а також враховуючи результати праці [2], запишемо

$$\frac{\partial\left(\Gamma - (A - W_{\mathrm{e}} - W_{\mathrm{p}}^{(1)})\right)}{\partial\ell}\cdot\frac{d\ell}{dN} - \frac{\partial W_{\mathrm{p}}^{(2)}}{\partial N} = 0\,. \tag{3}$$

На основі результатів [9] похідну від виразу за ℓ у лівій частині рівняння (3) визначаємо так:

$$\frac{\partial\left(\Gamma - (A - W_{\mathrm{e}} - W_{\mathrm{p}}^{(1)})\right)}{\partial\ell} = \gamma_{fC} - \gamma_t\,, \tag{4}$$

де γ_t − питома енергія пластичного деформування у зоні передруйнування біля вершини тріщини, яка залежить тільки від її довжини ℓ; γ_{fC} − питома енергія руйнування при поширенні повзучо-втомної тріщини.

У випадку блочного навантаження з витримкою у блоці розглядаємо практичні часи витримок. Тоді основну частку часу інкубаційного періоду займатиме неусталена повзучість. Із результатів експериментальних досліджень відомо, що швидкість зміни енергії деформування за повзучості є порівняно малою величиною, тому надалі в обчисленнях нею будемо нехтувати. Для цього випадку з рівняння (3), враховуючи (4) і результати [2], для швидкості поширення макротріщини отримаємо рівняння

$$\frac{d\ell}{dN} = \frac{W_1}{\gamma_{fC} - \gamma_t} \tag{5}$$

з початковою

$$N = 0, \qquad \ell(0) = \ell_0\,, \tag{6}$$

і кінцевою умовами

$$N = N_*, \qquad \ell(N_*) = \ell_*, \qquad \gamma_t(\ell_*) = \gamma_{fC}\,. \tag{7}$$

Тут $W_1 = \sum_{\nu=1}^{n} W_1^{(\nu)} + \sum_{i=1}^{k} W_2^{(i)}$ − робота пластичних деформацій розтягу у зоні передруйнування біля вершини тріщини за час одного блоку навантаження, які генерує сама пластина; $W_1^{(\nu)}$, $\nu = 1,\ldots,n$, − робота пластичних деформацій розтягу для ν-го піку навантаження без витримки в блоці; n − кількість піків навантаження без витримки в блоці; $W_2^{(i)}$ − робота пластичних деформацій розтягу для i-го піку навантаження з витримкою в блоці; k − кількість піків навантаження з витримкою в блоці.

Використовуючи результати праць [2, 3], для величин W_1, γ_{fC}, γ_t, що входять у рівняння (5), отримаємо такі вирази:

$$W_1 = \frac{1}{4}\alpha_0\sigma_t^{-1}E^{-2}\pi^2\ell^2\sum_{i=1}^{n_1}(1-R_i)^4\left[\left(F_{1i\max}^2 + F_{2i\max}^2 + A_2\left[\frac{F_{2i\max}}{K_{fC}}\right]^{2m}(\pi\ell)^{2m-1}\ln\left(\frac{t_0+T_i}{t_1}\right)\right)^2 - \left(F_{\text{th}}^2 + A_2\left[\frac{F_{\text{th}}}{K_{fC}}\right]^{2m}(\pi\ell)^{2m-1}\ln\left(\frac{t_0+T_i}{t_1}\right)^2\right)\right],$$

$$\gamma_t = \pi\ell E^{-1}F_s^2, \quad \gamma_C = K_{fC}^2E^{-1}, \quad F_s = \max_i\{F_{1i}, F_{2i}\}, \tag{8}$$

де α_0 – втомна характеристика матеріалу, яка визначається із експерименту; A_1, m, t_1 – експериментально встановлені константи високотемпературної повзучості; $A_2 = A_1t_0E\sigma_t$; $t_0 = 1$ год; $R_i = F_{i\min}/F_{i\max}$; n_1 – кількість циклів у блочному навантаженні $F(t)$. Тут n_1 складається із n ділянок у блоці навантаження $F_1(t)$ зі своїм максимумом $F_{1i\max}$ і мінімумом $F_{1i\min}$ і k ділянок у блочному навантаженні з витримкою у блоці $F_2(t)$ зі своїм максимумом $F_{2i\max}$ і мінімумом $F_{2i\min}$ (рис. 1); T_i – час i-ї витримки навантаження $F_{2i}(t)$; F_{th} – величина зовнішнього навантаження, за якого не буде поширення тріщини $(K_{\text{th}} = F_{\text{th}}\sqrt{\pi\ell})$; K_{fC} – критичне значення коефіцієнта інтенсивності K_I напружень за блочного навантаження; E – модуль пружності; σ_t – усереднені напруження у зоні передруйнування.

Підставивши (8) у рівняння (5), з використанням (6), (7) отримаємо

$$\frac{d\ell}{dN} = \frac{\alpha_0\pi^2\ell^2}{4\sigma_tE[K_{fC}^2 - F_s^2\pi\ell]}\sum_{i=1}^{n_1}(1-R_i)^4\left[\left(F_{1i\max}^2 + F_{2i\max}^2 + A_2\left[\frac{F_{2i\max}}{K_{fC}}\right]^{2m}(\pi\ell)^{2m-1}\ln\left(\frac{t_0+T_i}{t_1}\right)\right)^2 - \left(F_{\text{th}}^2 + A_2\left[\frac{F_{\text{th}}}{K_{fC}}\right]^{2m}(\pi\ell)^{2m-1}\ln\left(\frac{t_0+T_i}{t_1}\right)\right)^2\right], \tag{9}$$

$$N = 0, \qquad \ell(0) = \ell_0, \tag{10}$$

$$N = N_*, \quad \ell(N_*) = \ell_*, \qquad K_I(\ell_*) = K_{fC}. \tag{11}$$

Таким чином, розв'язок задачі (5)–(7) подано рівнянням (9) та умовами (10), (11).

Пластина із системою повзучо-втомних тріщин. Розглянемо пластину, послаблену системою m_1 макроскопічних тріщин, піддану дії змінних у часі зусиль $F(t)$ і нагріту до високої температури T_0, яка викликає в зоні передруйнування високотемпературну повзучість. Нехай конфігурація пластини та геометричне розміщення тріщин визначаються лінійними параметрами $a_1,\ldots,a_{k_1}$, а геометрична конфігурація кожної тріщини – параметрами $b_1,\ldots,b_p$. Приймемо параметри такими, що при $a_q \to \infty$, $q = 1,2,\ldots,k_1$, отримаємо необмежену пластину, послаблену однією тріщиною конфігурації b_j, $j = 1,\ldots,m_1$. Виберемо в s-й вершині, $s = 1,2$, кожної тріщини L_j

локальну систему координат $O^{(j,s)}\rho^{(j,s)}\theta^{(j,s)}$ (див. рис. 2, де наведено схему навантаження пластини із системою повзучо-втомних тріщин) і позначимо через $\Delta\ell^{(j,s)}$ приріст j-ї тріщини відповідно на її кінцях. Вважаємо, що зміна зусиль має блочний характер, які змінюються як $F(t)$ (див. рис. 1). Задача полягає у визначенні кількості блоків $N = N_*$ (залишкова довговічність), за досягнення якої довжина однієї з тріщин L_ξ досягне критичного значення $\ell_\xi = \ell_{\xi *}$, і пластина зруйнується.

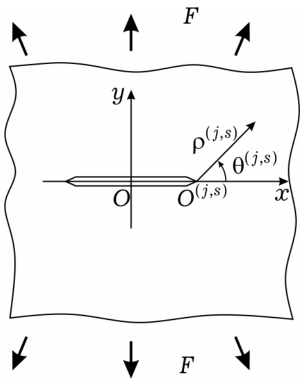


Рис. 2

Для реалізації такої задачі зробимо узагальнення на випадок поданого вище енергетичного підходу, а також скористаємося відомою [5] гіпотезою, що поширення повзучо-втомних тріщин буде проходити у напрямку максимально можливих їх швидкостей. В результаті цього задачу зведемо до розв’язання такої системи диференціальних рівнянь:

$$\frac{d\ell^{(j,s)}}{dN} = \frac{W_1^{(j,s)}}{\gamma_{fC} - \gamma_t^{(j,s)}}, \tag{12}$$

$$\frac{\partial}{\partial\theta^{(j,s)}}\left[\frac{W_1^{(j,s)}}{\gamma_{fC} - \gamma_t^{(j,s)}}\right]_{\theta^{(j,s)}=\theta_t^{(j,s)}} = 0 \tag{13}$$

за початкової

$$N = 0, \qquad \ell^{(j,s)}(0) = \ell_0^{(j,s)}, \tag{14}$$

і кінцевої умов

$$N = N_*, \qquad \ell^{(\xi,s)}(N_*) = \ell_*^{(\xi,s)}, \qquad \gamma_t^{(\xi,s)}\left(\ell_*^{(\xi,s)}\right) = \gamma_{fC},$$

$$\max_j\left[\gamma_t^{(j,s)}\left(\ell_*^{(j,s)}\right)(\gamma_{fC})^{-1}\right] = \gamma_t^{(\xi,s)}\left(\ell_*^{(\xi,s)}\right)(\gamma_{fC})^{-1}. \tag{15}$$

Тут $W_1^{(j,s)} = \sum_{\nu=1}^{n} W_{1\nu}^{(j,s)} + \sum_{i=1}^{k} W_{2i}^{(j,s)}$ – робота пластичних деформацій розтягу у зоні передруйнування біля s-ї вершин тріщини L_j, які генерує сама пластина; $W_{1\nu}^{(j,s)}$ – робота пластичних деформацій розтягу для ν-го піку навантаження без витримки в блоці; $W_{2i}^{(j,s)}$ – робота пластичних деформацій розтягу для i-го піку навантаження з витримкою в блоці; $\gamma_t^{(j,s)}$ – величина роботи пластичних деформацій у зоні передруйнування біля s-ї вершин тріщини L_j; γ_{fC} – її критичне значення; $\theta_t^{(j,s)}$ – значення кутів $\theta^{(j,s)}$, що визначають напрямок поширення кінців L_j тріщини; $\ell_*^{(j,s)}$ – критичне підростання s-го кінця тріщини L_j при руйнуванні пластини. Згідно з [2, 5] ці величини визначаємо так:

$$W_1^{(j,s)}(\ell) = \alpha_0 \int_0^{\ell^{(j,s)}} \left(\left(\delta_{I\theta}^{(j,s)}(x)\sigma_{0t}^{(j,s)} + \delta_{II\theta}^{(j,s)}(x)\tau_{0t}^{(j,s)}\right) - \right.$$
$$\left. - \left(\left(\delta_{I\,\mathrm{th}\,\theta}^{(j,s)}(x)\sigma_{0t}^{(j,s)} + \delta_{II\,\mathrm{th}\,\theta}^{(j,s)}(x)\tau_{0t}^{(j,s)}\right)\right)dx,$$

$$\gamma_t^{(j,s)}(\ell) = \delta_t^{(j,s)}\sigma_t^{(j,s)} = \delta_{It}^{(j,s)}\sigma_{I0t}^{(j,s)} + \delta_{IIt}^{(j,s)}\tau_{0t}^{(j,s)},$$

$$\gamma_{fC} = \delta_C \sigma_t = (K_{fC}^{(j)})^2 E^{-1},$$

$$\delta_{It}^{(j,s)} = \frac{(K_{I\theta}^{(j,s)})^2}{E\sigma_{0t}^{(j,s)}}, \quad \delta_{IIt}^{(j,s)} = \frac{(K_{II\theta}^{(j,s)})^2}{E\tau_{0t}^{(j,s)}}, \tag{16}$$

де $\delta_t^{(j,s)}$ – розкриття у зоні передруйнування біля s-ї вершини тріщини L_j; $\delta_{I\theta}^{(j,s)}$, $\delta_{II\theta}^{(j,s)}$ – проекції $\delta_t^{(j,s)}$ на напрямні орти полярної системи координат $O^{(j,s)}\rho^{(j,s)}\theta^{(j,s)}$ (рис. 2); $\sigma_t^{(j,s)}$ – усереднені напруження в зоні передруйнування біля s-ї вершини тріщини L_j; $\sigma_{0t}^{(j,s)}$, $\tau_{0t}^{(j,s)}$ – відповідні їх проекції; $K_I^{(j,s)}$, $K_{II}^{(j,s)}$ – коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) біля s-ї вершини j-ї тріщини вздовж лінії її розміщення; $K_{I\theta}^{(j,s)}$, $K_{II\theta}^{(j,s)}$ – аналогічні значення уздовж напрямку під кутом θ до дотичної в s-му кінці j-ї тріщини.

Таким чином, розв'язок поставленої задачі про визначення залишкової довговічності пластини із системою повзучо-втомних тріщин в умовах дії блочного навантаження визначається математичною моделлю (12)–(15) з урахуванням співвідношень (16) і відомих коефіцієнтів інтенсивності напружень $K_I^{(j,s)}$, $K_{II}^{(j,s)}$.

Залежність залишкової довговічності пластини від форми блоку навантаження. Розглянемо нескінченну пластину, послаблену прямолінійною тріщиною початкової довжини $2\ell_0$, яка в нескінченно віддалених точках піддана дії рівномірно розподілених зусиль $F(t,\theta)$, зміна яких з часом і за напрямком носить блочний характер (рис. 1). Задача полягає у визначенні такої кількості $N = N_*$ блоків навантаження, за досягнення якої тріщина досягне критичного значення довжини $\ell = \ell_*$, і пластина зруйнується.

Розв'язок задачі отримаємо за наведеною вище математичною моделлю (12)–(15), яка в даному випадку набуде вигляду

$$\frac{d\ell}{dN} = \frac{W_1}{\gamma_{fC} - \gamma_t}, \qquad \frac{\partial}{\partial\theta}\left[\frac{W_1}{\gamma_{fC} - \gamma_t}\right]_{\theta=\theta_*} = 0, \tag{17}$$

$$N = 0, \quad \ell(0) = \ell_0,$$

$$N = N_*, \quad \ell(N_*) = \ell_*, \quad \gamma_t(\ell_*) = \gamma_{fC}. \tag{18}$$

Тут W_1 визначаємо за співвідношенням (8). Для спрощення обчислень приймаємо $F_{\text{th}} \approx 0$. Вважаємо, що пластина із тріщиною піддана дії двочастотного навантаження з частотами ω_1, ω_2:

$$F(t) = b\left[1 + \sin(0.5t\omega_1(1+\eta))\cos(0.5t\omega_1(1-\eta))\right],$$

$$0 \le \omega_2/\omega_1 = \eta \le 1. \tag{19}$$

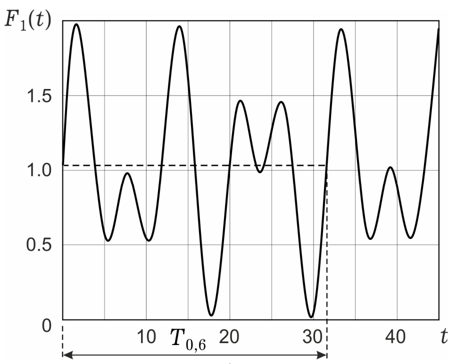
Для кожного значення $\eta = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ будуємо залежність $F(t)$ і визначаємо період і форму зміни циклу. На рис. 3 зображено графіки зміни $F(t)$ для випадку $\eta = 0.6$ (цикли в блоці без витримки показано на рис. 3*а*, а цикли із витримками – на рис. 3*б*). Розбиваємо кожен цикл з періодами $T_{n\eta}$ ($\eta = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$) на n ділянок з піками зміни $F(t)$ (див. рис. 1 та рис. 3) і для кожної ділянки визначаємо $F_{1i\max}$, $F_{2i\max}$ і $F_{1i\min}$, $F_{2i\min}$. Тоді, інтегруючи (17) за умов (18) з урахуванням (8) і (19), отримаємо співвідношення для визначення критичної кількості блоків навантаження N_*:

$$N_* = \frac{4\sigma_t E}{\alpha_0 \pi^2} \int_{\ell_0}^{\ell_*} \ell^{-2} \left[K_{fC}^2 - F_s^2 \pi \ell \right] \left[\sum_{\nu=1}^{n} \left(F_{1\nu\max} - F_{1\nu\min} \right)^2 + \right.$$

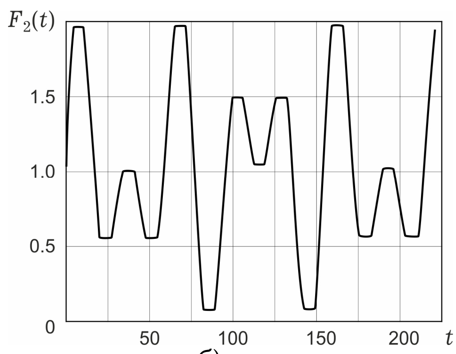
$$+ \sum_{i=1}^{k} \left(F_{2i\max} - F_{2i\min} \right)^2 + A_2 K_{fC}^{-2m} \times$$

$$\left. \times \sum_{i=1}^{k} \left(F_{2i\max}^{2m} - F_{2i\min}^{2m} \right) (\pi\ell)^{2m-1} \ln \left(\frac{t_0 + T_i}{t_1} \right) \right]^{-2} d\ell . \qquad (20)$$

Для числового аналізу формули (20) задавали такі механічні та геометричні характеристики матеріалу [10]: $\alpha_0 = 1.24$, $\ell_0 = 1.3$ мм, $\sigma_t = 450$ МПа, $K_{fC} = 100$ МПа $\sqrt{\text{м}}$, $E = 1.9 \cdot 10^5$ МПа, $b = 120$ МПа, $A_1 = 1.25 \cdot 10^{-5}$ м/год, $m = 0.85$, $T = 12$ год, $t_1 = 0.0128$ год. На основі цих даних за співвідношенням (20) побудовано залежність N_* від η (див. рис. 4) у випадку, коли у блоці є тільки цикли з витримкою (крива *2*) і цикли без витримки (крива *1*). Як видно з рис. 4, блочне навантаження з часовою витримкою (крива *2*) призводить до зменшення залишкової довговічності пластини. Також бачимо, що зі збільшенням відношення частот η довговічність знижується, що підтверджують експерименти (у випадку, коли в блоці є тільки цикли без витримки) [8].



а)



б)

Рис. 3

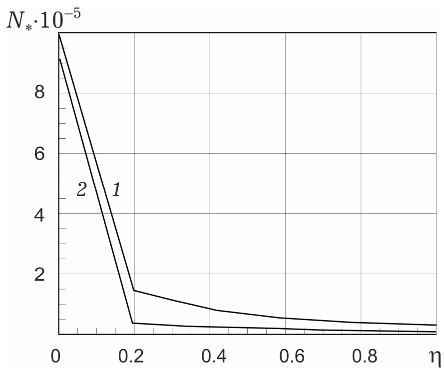


Рис. 4

Вплив навантаження вздовж тріщини. В інженерній практиці часто зустрічаються випадки, коли в тонкостінному елементі конструкції тріщина є постійно навантажена перпендикулярно до лінії її розміщення, а сам елемент конструкції розтягується циклічно вздовж цієї лінії. У цьому випадку $\Delta K_I = 0$ і, як стверджують окремі дослідники [7], поширення тріщини відсутнє: $V = 0$, хоча насправді тріщина буде поширюватись, тобто $V \neq 0$. Запропонована розрахункова модель дозволяє дослідити і такі випадки. Застосуємо її для дослідження поширення заданих тріщин. Для цього випадку приймемо, що

$$p = p_0 = \text{const},$$

$$q = p_0(1 + \sin \omega t),$$

$$0.2 \le \eta_1 = 2p_0\sigma_t^{-1} \le 1.$$

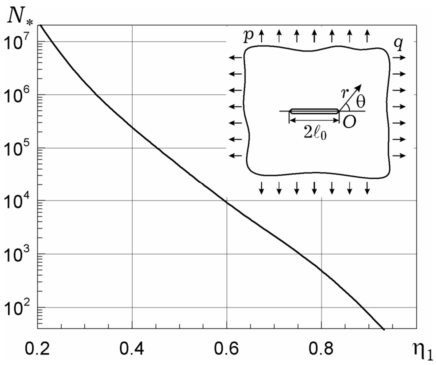


Рис. 5

Оскільки тріщина поширюється уздовж лінії розміщення (див. схему навантаження пластини на рис. 5), то кінетику її розвитку можна подати рівнянням (9), яке набуде вигляду

$$\frac{d\ell}{dN} = \frac{\alpha_0\sigma_t}{E}\left[K_{I\max}^2\left(\frac{\sigma_{0f}^{(\max)} - \sigma_{0f}^{(\min)}}{\sigma_{0f}^{(\min)}\sigma_{0f}^{(\max)}}\right) + A_2\sigma_t^m\left[\frac{K_{I\max}}{K_{fC}}\right]^{2m} \times\right.$$

$$\left.\times\left(\frac{\left(\sigma_{0f}^{(\max)}\right)^m - \left(\sigma_{0f}^{(\min)}\right)^m}{\left(\sigma_{0f}^{(\min)}\right)^m\left(\sigma_{0f}^{(\max)}\right)^m}\right)\ln\left(\frac{t_0+T}{t_1}\right)\right]^2 \cdot \left[K_{fC}^2 - K_{I\max}^2\right]^{-1},$$

$$A_2 = A_1 t_0 E, \tag{21}$$

де з урахуванням умови текучості Губера – Мізеса [6] напруження $\sigma_{0f}^{(\max)}$ і $\sigma_{0f}^{(\min)}$ запишемо як

$$\sigma_{0f}^{(\max)} = \sigma_t, \qquad \sigma_{0f}^{(\min)} = 0.5\sigma_t\left(-\eta_1 + \sqrt{4 - 3\eta_1^2}\right). \tag{22}$$

Критичну довжину тріщини визначаємо за формулою $\ell_* = K_{fC}^2\pi^{-1}p_0^{-2}$, де для спрощення обчислень приймаємо, що $K_{fC} = 0.125\sigma_t\sqrt{\pi}$.

Інтегруючи рівняння (21) з урахуванням (22), для обчислення періоду докритичного росту тріщини N_* отримаємо співвідношення

$$N_* = \frac{\pi E}{\alpha_0\sigma_t}\int_{\ell_0}^{\ell_*}\left[0.125^2 - 0.5^2\eta_1^2\ell\right]\left[0.5^2\eta_1^2\ell\pi(1-Y)Y^{-1} + \right.$$

$$\left. + A_3 4^{2m}\eta_1^{2m}\ell^m(1-Y^m)Y^{-m}\ln\left((t_0+T)t_1^{-1}\right)\right]^{-2}d\ell, \tag{23}$$

де $A_3 = A_2\sigma_t^{-1}$ і $Y = 0.5\left(-\eta_1 + \sqrt{4 - 3\eta_1^2}\right)$.

На основі формул (23) на рис. 5 побудовано графік залежності залишкової довговічності N_* від параметра навантаження $\eta_1 = 2p_0\sigma_t^{-1}$. Бачимо, що збільшення величини зусиль p_0, що діють на тріщину, різко зменшує довговічність пластини.

Висновки. З використанням енергетичного підходу побудовано математичну модель для визначення періоду докритичного росту повзучо-втомних тріщин в тонкостінних елементах конструкцій за блочного навантаження, яка добре описує руйнування матеріалу, що при цьому відбувається. Неврахування повзучості в блоці навантаження може призвести до передчасного руйнування елемента конструкції. Отримані розрахункові дані показали фізичну коректність запропонованої моделі.

1. *Андрейкив А. Е., Дарчук А. И.* Усталостное разрушение и долговечность конструкций. – Киев: Наук. думка, 1992. – 184 с.

2. *Андрейків О. Є., Долінська І. Я., Яворська Н. В.* Оцінка періодів зародження і поширення повзучо-втомних тріщин у тонкостінних елементах конструкцій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 3. – С. 7–15.
   Те саме: *Andreikiv O. E., Dolins'ka I. Ya., Yavors'ka N. V.* Estimation of the periods of initiation and propagation of creep-fatigue cracks in thin-walled structural elements // Mater. Sci. – 2011. – **47**, No. 3. – P. 752–763.
3. *Андрейків О. Є., Кіт М. Б., Хиль С. В.* Математичне моделювання втомного руйнування пластин з тріщинами за блочного навантаження // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2012. – **55,** № 1. – С. 103–112.
   Те саме: *Andreikiv O. E., Kit M. B., Khyl' S. V.* Mathematical modeling of fatigue fracture of plates with cracks under block loading // J. Math. Sci. – 2013. – **190**, No. 6. – P. 752–763.
4. *Андрейків О. Є., Хиль С. В., Матвіїв Ю. Я.* Розрахункова модель для визначення періоду докритичного росту тріщин в пластинах при блочному навантаженні // Доп. НАН України. – 2012. – № 1. – С. 48–54.
5. *Андрейків О., Хиль С., Долінська І.* Методи оцінювання залишкового ресурсу елементів конструкцій за блочного навантаження // Вісн. Тернопільськ. нац. техн. ун-ту. – 2011. – Спецвип., ч. 2. – С. 20–28.
6. *Панасюк В. В.* Механика квазихрупкого разрушения материалов. – Киев: Наук. думка, 1991. – 416 с.
7. *Романив О. Н., Ярема С. Я., Никифорчин Г. Н., Махутов Н. А., Стадник М. М.* Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 680 с. – (Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4 т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – Т. 4.)
8. *Труфяков В. И., Ковальчук В. С.* Определение долговечности при двухчастотном нагружении (Обзор) // Проблемы прочности. – 1982. – № 9. – С. 9–15; – № 10. – С. 15–20.
   Те саме: *Trufyakov V. I., Koval'chuk V. S.* Determination of longevity under a two-frequency load (review). Report 1; Report no. 2. Proposed method // Strength mater. – 1982. – **14**, No. 9. – P. 1165–1173; – No. 10. – P. 1303–1308.
9. *Шата М., Терлецька З. О.* Енергетичний підхід у механіці втомного поширення макротріщини // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під заг. ред. В. В. Панасюка: В 3 т. – Т. 2: Аналітичні методи в механіці руйнування матеріалів. – Львів: Каменяр, 1999. – С. 141–148.
10. *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 // Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct. –1988. – **11**, No. 5. – P. 355–370.
11. *Handbook* of fatigue crack propagation in metallic structures / A. Carpinteri (Ed.). – Amsterdam: Elsevier Sci. B. V., 1994. – 1765 p.
12. *Panasyuk V. V., Andreikiv O. Ye., Ritche R. O., Darchuk O. I.* Estimation of the effects of plasticity and resulting crack closure during small fatigue crack growth // Int. J. Fract. – 2001. – **107**, No. 2. – P. 99–115.
13. *Schijve J.* Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art // Proc. ECF-14 (Cracow, Poland, Sept. 8–13, 2002). – 2002. – Vol. III. – P. 211–262.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА ДОКРИТИЧЕСКОГО РОСТА ПОЛЗУЧЕ-УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН ПРИ БЛОЧНОЙ НАГРУЗКЕ

Сформулирована математическая модель для исследования процессов распространения ползуче-усталостных трещин в пластинах при блочной нагрузке. Исследовано влияние формы блоков нагрузки на долговечность элементов конструкций. Определен докритический рост ползуче-усталостных трещин в тонкостенных элементах конструкций.

DETERMINATION OF PERIOD OF SUBCRITICAL CREEP-FATIGUE CRACKS GROWTH UNDER BLOCK LOADING

The mathematical model to study the processes of creep-fatigue cracks propagation in plates under block loading is formulated. The effect of the blocks loading shape on the life-time of structural elements is investigated. The subcritical growth of creep-fatigue cracks in thin-walled structural elements is determined.

[1] Львів. нац. ун-т імені Івана Франка, Львів,
[2] Фіз.-мех. ін-т ім. Г. Карпенка НАН України, Львів

Одержано
30.01.14