УДК:539.375: 539.4: 536.543

О. Є. Андрейків[1,2], Н. В. Яворська[2], В. З. Кухар[2]

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ПЛАСТИН З СИСТЕМАМИ ТРІЩИН ЗА ДІЇ ДОВГОТРИВАЛОГО СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ, ВИСОКОЇ ТЕМПЕРАТУРИ І ВОДНЮ

Сформульовано розрахункові моделі для визначення довговічності пластин з системами тріщин за довготривалих статичних навантажень, високої температури і водневмісних середовищ. Ці моделі базуються на першому законі термодинаміки балансу енергетичних складових і швидкостей їх зміни в металевому тілі, що містить макротріщину і піддане дії довготривалого розтягу, високотемпературного поля і водневмісного середовища. Розглянуто конкретні випадки періодичної і двоперіодичної систем тріщин.

Вступ. Однією із важливих проблем при експлуатації енергетичного обладнання, особливо теплових і атомних електростанцій, є визначення залишкового ресурсу їх елементів, послаблених тріщинами. У таких елементах при довготривалому статичному навантаженні і високій температурі розвиваються тріщини високотемпературної повзучості, які ростуть, досягають критичного значення і виникає можливість катастрофічного руйнування конструкції.

Одним з чинників, від якого достатньо сильно залежить повзучість матеріалів, є робоче середовище, в якому експлуатуються деталі. Дослідженню впливу зовнішнього середовища на характеристики повзучості та довготривалої міцності металів присвячено достатню кількість праць [8–12, 14]. При цьому виявлено [10], що зовнішнє середовище часто призводить до зменшення часу до руйнування конструкції під час повзучості в 1–3 рази.

Одним з найбільш агресивних середовищ вважається водневмісне. На сьогодні не відомі математичні моделі, які давали би змогу при розрахунку залишкової довговічності елементів енергетичного устаткування за високих температур і довготривалого статичного навантаження врахувати ще й вплив водню. Саме тому в цій роботі запропоновано розрахункову модель для знаходження ресурсу елементів конструкцій з тріщинами за високих температур, дії довготривалого статичного навантаження і впливу водневмісного середовища. Застосування цієї моделі продемонстровано при розв'язанні задач про визначення ресурсу пластин із системами тріщин за довготривалого розтягу, високої температури і впливу водневмісного середовища.

Математична модель для випадку пластини з однією тріщиною. Розглядаємо металеву пластину з прямолінійною тріщиною довжини ℓ_0 з координатами вершин $x = a_s$, $s = 1,2$ (рис. 1), яка перебуває під дією довготривалого статичного навантаження інтенсивності p, високої температури T_0, що викликає в пластично-деформованих областях біля вершин тріщини явище високотемпературної повзучості [12], та водню H_2 з концентрацією C_0 на поверхнях вершин тріщини. Вважаємо, що тріщина макроскопічна, а напружено-деформований стан у пластині симетричний відносно осі Ox (рис. 1). Задача полягає у визначенні часу $t = t_*$, після досягнення якого тріщина підросте до критичного розміру $\ell = \ell_*$, і пластина зруйнується.

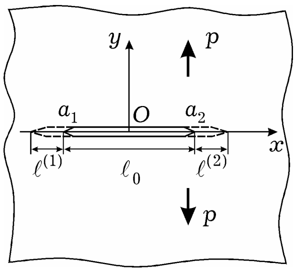

Рис. 1

Для побудови математичної моделі, яка описує цей процес, скористаємося припущенням про те, що рух тріщини від початкового розміру $\ell = \ell_0$

до кінцевого $\ell = \ell_*$ є неперервним. Таке припущення є коректним, оскільки реальний стрибкоподібний рух тріщини високотемпературної повзучості для обох її вершин супроводжується стрибками малого розміру $\Delta\ell^{(s)}$ на її кінцях $\ell^{(s)}$, $s = 1, 2$, за відносно великі проміжки часу Δt [5]. Тому для кожного елементарного стрибка тріщини швидкість її поширення можемо записати наближено у такому вигляді:

$$V = \frac{d\ell}{dt} \approx \frac{\Delta\ell^{(s)}}{\Delta t}, \tag{1}$$

а рівняння енергетичного балансу складових навантаження і деформування подамо так [5]:

$$A + Q = W^{(s)} + \Gamma + K. \tag{2}$$

Тут A − робота зовнішніх сил; $Q = \text{const}$ − теплова енергія, створена зовнішніми джерелами тепла; Γ − енергія руйнування тіла, яка залежить тільки від довжини тріщини ℓ; K − кінетична енергія, яка в розглядуваному випадку є неістотною, тому нею знехтуємо; $W^{(s)}$ − енергія деформування тіла після просування вершин тріщини на величину $\Delta\ell^{(s)}$, яку подамо у такому вигляді:

$$W^{(s)} = W_{\text{e}}^{(s)} + W_{\text{p},1}^{(s)}(\ell) - W_{\text{p},2}^{(s)}(t), \tag{3}$$

де $W_{\text{e}}^{(s)}$ − пружна складова енергії деформування; $W_{\text{p},1}^{(s)}(\ell)$ − частина енергії пластичного деформування, що залежить від довжини тріщини $\ell^{(s)}$; $W_{\text{p},2}^{(s)}(t)$ − частина енергії пластичного деформування за сталої довжини тріщини, що залежить від часу t, концентрації водню C_0 і генерується самим тілом.

Оскільки виконується умова балансу енергій (2), то буде виконуватися і рівняння балансу швидкостей зміни цих енергій:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial W^{s}}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma}{\partial t}. \tag{4}$$

Підставивши вираз (3) в (4), отримаємо

$$\frac{\partial}{\partial \ell^{(s)}}[\Gamma - (A - W_{\text{e}}^{(s)} - W_{\text{p},1}^{(s)})]\frac{d\ell^{(s)}}{dt} - \frac{\partial W_{\text{p},2}^{(s)}}{\partial t} = 0. \tag{5}$$

На основі результатів праці [5] запишемо

$$\frac{\partial}{\partial \ell^{(s)}}[\Gamma - (A - W_{\text{e}}^{(s)} - W_{\text{p},1}^{(s)})] = \gamma_C - \gamma_t^{(s)}, \tag{6}$$

де $\gamma_t^{(s)}$ − питома робота пластичних деформацій в зоні передруйнування у s-й вершині тріщини при її зростанні; γ_C − критичне значення питомої роботи пластичних деформацій.

Тепер, підставивши (6) у (5), співвідношення для визначення швидкості поширення тріщини повзучості можемо записати у такому вигляді:

$$V = \frac{d\ell^{(s)}}{dt} = \left[\frac{\partial W_{\text{p},2}^{(s)}}{\partial t}\right]\Bigg|_{t=\Delta t} [\gamma_C - \gamma_t^{(s)}]^{-1}. \tag{7}$$

Для повноти математичної моделі до рівняння (7) додаємо такі початкову та кінцеву умови:

$$t = 0: \qquad \ell^{(1)} = \ell^{(2)} = 0,$$
$$t = t_*: \qquad \ell(t_*) = \ell_*, \tag{8}$$

а критичну довжину тріщини ℓ_* визначаємо з енергетичного критерію:

$$\gamma_t^{(s)}(\ell_*) = \gamma_C, \qquad s = 1, 2, \qquad \ell_* = \ell_0 + \ell^{(1)} + \ell^{(2)}. \tag{9}$$

Складові рівняння (7) на основі результатів роботи [5] запишемо так:

$$\gamma_t^{(s)} = \sigma_t \delta_{It}^{(s)}, \qquad \gamma_C = \sigma_t \delta_{IC}, \tag{10}$$

$$W_{\mathrm{p},2}^{(s)}(t, C_0) = \alpha_0 \sigma_t [\delta_{It}^{(s)} + t\,\dot{\delta}_{It}^{(s)}(C_0)]^2. \tag{11}$$

Тут $\sigma_t = \sigma_{0,2} + 0.5A\varepsilon_t^m$; $\sigma_{0,2}$ – границя текучості; A, m – параметри істинної діаграми розтягу; $\dot{\delta}_{It}^{(s)}$ – швидкість розкриття зони передруйнування; $\delta_{It}^{(s)}$ – розкриття у s-й вершині тріщини; α_0 – константа, яка визначається експериментально [5].

З урахуванням співвідношень (10), (11) математична модель для визначення періоду докритичного росту прямолінійної тріщини високотемпературної повзучості при дії водневмісного середовища матиме вигляд

$$\frac{d\ell^{(s)}}{dt} = \frac{2\alpha_0 \left[\dot{\delta}_{It}^{(s)}(C_0) + t\,\dfrac{\partial \dot{\delta}_{It}^{(s)}(C_0)}{\partial t} \right]\Bigg|_{t=\Delta t}}{1 - \delta_{IC}^{-1}\delta_{It}^{(s)}}, \tag{12}$$

з початковою і кінцевою умовами

$$t = 0: \qquad \ell^{(1)} = \ell^{(2)} = 0,$$

$$t = t_*: \qquad \ell(t_*) = \ell_*, \qquad \ell_* = \ell_0 + \ell^{(1)} + \ell^{(2)},$$

$$\gamma_t^{(s)}(\ell_*) = \gamma_C, \qquad s = 1, 2. \tag{13}$$

Далі, аналогічно до [2, 3], побудовано математичну модель для визначення залишкового ресурсу пластини із системою тріщин, підданої дії довготривалого статичного навантаження, високої температури і впливу водневмісного середовища.

Математична модель для випадку пластини з системою тріщин. Розглянемо металеву пластину, послаблену системою m макроскопічних тріщин L_j, $j = 1, \ldots, m$, яка перебуває під дією довготривалого статичного навантаження із силовим параметром p, високої температури та впливу водню, який створює на e-й поверхні вершини j-ї тріщин концентрацію C_{0j}^e, $e = 1, 2$. Нехай конфігурація пластини та геометричне розміщення тріщин визначаються лінійними параметрами $a_1, \ldots, a_k$, а геометрична конфігурація кожної тріщини – параметрами $b_1, \ldots, b_m$. Прийнявши параметри a_q такими, що при $a_q \to \infty$, $q = 1, \ldots, k$, отримаємо необмежену пластину, послаблену однією тріщиною конфігурації b_j.

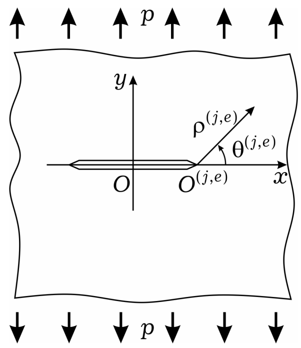

Рис. 2

Виберемо в e-й вершині кожної тріщини L_j локальну систему координат $O^{(j,e)}\rho^{(j,e)}\theta^{(j,e)}$ (рис. 2) і позначимо через $\Delta\ell_j^{(e)}$ приріст j-ї тріщини відповідно на її кінцях. Задача полягає у визначенні часу $t = t_*$, після досягнення якого довжина L_j однієї з тріщин підросте до критичного значення $\ell^{(j)} = \ell_*^{(j)}$, і пластина зруйнується.

Для розв'язання задачі зробимо узагальнення на такий випадок наведеного вище енергетичного підходу, а також скористаємося відомою [5] гіпотезою про те, що поширення повзучих тріщин буде проходити в напрямку максимально можливих швидкостей росту тріщин. Таким чином, задачу зведемо до розв'язування системи диференціальних рівнянь

$$\frac{d\ell^{(j,e)}}{dt} = \left[\frac{\partial W_{\text{p},2}^{(j,e)}}{\partial t}\right]\Bigg|_{t=\Delta t} [\gamma_C - \gamma_t^{(j,e)}]^{-1},$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta^{(j,e)}} \left[\left(\frac{\partial W_{\text{p},2}^{(j,e)}}{\partial t} \right)_{t=\Delta t} [\gamma_C - \gamma_t^{(j,e)}]^{-1} \right] \Bigg|_{\theta^{(j,e)} = \theta_t^{(j,e)}} = 0 \tag{14}$$

з початковими і кінцевими умовами

$$t = 0: \qquad \ell^{(j,e)}(0) = \ell_0^{(j,e)}, \tag{15}$$

$$t = t_*: \qquad \ell^{(j,e)}(t_*) = \ell_*^{(j,e)}, \qquad \gamma_t^{(j,e)}(\ell_*^{(j,e)}) = \gamma_C,$$

$$\max_j \left\{ \gamma_t^{(j,e)}(\ell_*^{(j,e)})(\gamma_C)^{-1} \right\} = \gamma_t^{(j,e)}(\ell_*^{(j,e)})(\gamma_C)^{-1}. \tag{16}$$

Тут $W_{\text{p},2}^{(j,e)}$ – частина роботи пластичних деформацій під час повзучості при розтязі зони передруйнування біля e-ї вершини тріщини L_j, яка виділяється за постійної довжини тріщини, генерується самою пластиною і залежить тільки від часу t та концентрації водню C_{0j}^e; $\gamma_t^{(j,e)}$ – величина роботи пластичних деформацій у зоні передруйнування біля e-ї вершини тріщини L_j; γ_C – її критичне значення; $\theta_t^{(j,e)}$ – значення кутів $\theta^{(j,e)}$, що визначають напрямок поширення e-х кінців тріщини L_j; $\ell_*^{(j,e)}$ – критичне підростання e-го кінця тріщини L_j при руйнуванні пластини. Величини, які входять у (14)–(16), визначатимемо у такому вигляді [5]:

$$\left[\frac{\partial W_{\text{p},2}^{(j,e)}(t, C_{0j}^e)}{\partial t}\right]\Bigg|_{t=\Delta t} = 2\alpha_0 \delta_C \sigma_t \left[\frac{\partial}{\partial t}[\delta_{I\theta}^{(j,e)}\, \sigma_{0f}^{(j,e)} + \delta_{II\theta}^{(j,e)}\, \tau_{0f}^{(j,e)}]\right]\Bigg|_{t=\Delta t},$$

$$\delta_{I\theta}^{(j,e)} = \delta_{I\theta}^{(j,e)}(0,0,0) + t\, \dot{\delta}_{I\theta}^{(j,e)}(C_{0j}^e),$$

$$\delta_{II\theta}^{(j,e)} = \delta_{II\theta}^{(j,e)}(0,0,0) + t\, \dot{\delta}_{II\theta}^{(j,e)}(C_{0j}^e),$$

$$\gamma_t^{(j,e)} = \delta_t^{(j,e)} \sigma_t^{(j,e)} = \delta_{It}^{(j,e)} \sigma_{0t}^{(j,e)} + \delta_{IIt}^{(j,e)} \tau_{0t}^{(j,e)}, \qquad \gamma_C = \delta_C \sigma_t = K_{IC}^2 E^{-1},$$

$$\delta_{It}^{(j.e)} = \frac{(K_{I\theta}^{(j,e)})^2}{E\sigma_{0t}^{(j,e)}}, \qquad \delta_{IIt}^{(j,e)} = \frac{(K_{II\theta}^{(j,e)})^2}{E\tau_{0t}^{(j,e)}}, \qquad \delta_{It}^{(j,e)} = \frac{(K_{I\theta}^{(j,e)})^2}{E\tau_{0t}^{(j,e)}}, \tag{17}$$

де $\delta_t^{(j,e)}(x)$ – розкриття в зоні передруйнування біля e-ї вершини тріщини L_j; $\delta_{I\theta}^{(j,e)}$, $\delta_{II\theta}^{(j,e)}$ – проекції $\delta_t^{(j,e)}(x)$ на напрямні орти полярної системи координат $O^{(j,e)}\rho^{(j,e)}\theta^{(j,e)}$; $\sigma_t^{(j,e)}$ – усереднені напруження в зоні передруйнування біля e-ї вершини тріщини L_j; $\sigma_{0t}^{(j,e)}$, $\tau_{0t}^{(j,e)}$ – відповідні їх проекції; $K_{I\theta}^{(j,e)}$, $K_{II\theta}^{(j,e)}$ – коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) біля e-ї вершини j-ї тріщини вздовж напрямку під кутом $\theta_t^{j,e}$ до її дотичної.

Приймаючи, що в зоні передруйнування відбувається усталена повзучість, швидкість якої лінійно залежить від концентрації водню [6], отримуємо

$$\dot{\delta}_{I\theta}^{(j,e)}(C_{0j}^{e}) = \dot{\delta}_{I\theta}^{(j,e)}(0)[1 + \alpha_1\, C_0^{(j,e)}(t)]\,,$$

$$\dot{\delta}_{II\theta}^{(j,e)}(C_{0j}^{e}) = \dot{\delta}_{II\theta}^{(j,e)}(0)[1 + \alpha_1\, C_0^{(j,e)}(t)]\,,$$

де $C_0^{(j,e)}(t)$ – концентрація водню в найбільш напруженій точці зони передруйнування [1]: $C_0^{(j,e)}(t) = \alpha_2 t\, C_{0j}^{e}$. Тут α_1, α_2 – константи матеріалу, які визначаються експериментально [6].

Таким чином, кінетичні рівняння (14) з урахуванням умов (15), (16) і співвідношень (17) складають розрахункову модель для визначення залишкової довговічності пластини із системою тріщин, яка перебуває під дією довготривалого статичного навантаження, високої температури та впливу водневмісного середовища.

Застосування розрахункової моделі для визначення залишкової довговічності металевої пластини з двоперіодичною системою тріщин. Розглянемо нескінченну металеву пластину, послаблену двоперіодичною системою прямолінійних тріщин довжини $2\ell_0$, центри яких розміщені у вузлах квадратної решітки зі стороною h (рис. 3). Пластина перебуває під дією високої температури, впливу водневмісного середовища та розтягується у нескінченно віддалених точках рівномірно розподіленими зусиллями інтенсивності p, які напрямлені перпендикулярно до лінії розміщення тріщин. Задача полягає у визначенні часу $t = t_*$, після досягнення якого тріщини підростуть до критичного розміру $\ell = \ell_*$, і пластина зруйнується.

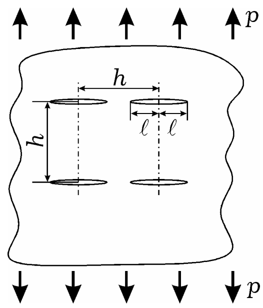

Рис. 3

Розв’язок задачі отримаємо на основі результатів робіт [1, 4, 5] і сформульованої вище математичної моделі (14)–(16). Розрахункову модель з урахуванням того, що напружено-деформований стан у пластині є симетричним відносно лінії розміщення тріщин, тобто описується в околі її вершини через коефіцієнти інтенсивності напружень, а також з використанням результатів роботи [6] запишемо в такому вигляді:

$$\frac{d\ell}{dt} = \frac{2\alpha_0 A_1 (K_I K_{IC}^{-1})^{2m}}{1 - K_I^2 K_{IC}^{-2}} + \frac{4\alpha_0\alpha_1\alpha_2 K_I^2 C_0}{\sigma_t E}\,, \tag{18}$$

з початковою та кінцевою умовами

$$t = 0: \qquad \ell(0) = \ell_0\,,$$

$$t = t_*: \qquad \ell(t_*) = \ell_*, \qquad K_I(\ell_*) = K_{IC}\,. \tag{19}$$

Тут α_1, α_2 – константи, які знаходимо експериментально [1].

Інтегруючи рівняння (18) за початкових і кінцевих умов (19), отримаємо формулу для визначення періоду $t = t_*$ докритичного росту тріщини в пластині з двоперіодичною системою тріщин:

$$t_* = \int\limits_{\ell_0}^{\ell_*} \frac{(1 - K_I K_{IC}^{-2})\, d\ell}{2\alpha_0 A_1 K^{2m} K_{IC}^{-2m} + 4\alpha_0\alpha_1\alpha_2\sigma_t^{-1} E^{-1} C_0 K_{IC}^2 (1 - K_I^2 K_{IC}^{-2})}\,, \tag{20}$$

де коефіцієнт інтенсивності напружень для розглядуваного випадку вибираємо у вигляді [13]

$$K_I = p\sqrt{\pi\ell}\,[1 + 8.8\cdot 10^{-2}\pi\lambda^2 + 1.8\cdot 10^{-2}\pi^2\lambda^4 -$$

$$- 2.6\cdot 10^{-3}\pi^3\lambda^6 + O(\lambda^8)], \qquad \lambda = 2\ell h^{-1}\,. \tag{21}$$

Обчислення виконано для випадку пластини, виготовленої зі сталі 15Х2МФА, для якої задаємо [6] такі параметри навантаження і характеристики матеріалу: $K_{IC} = 210\,\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$, $C_0 = 0.9 \cdot 10^6$, $A_1 = 0.356\,\text{м/год}$, $h = 0.15\,\text{м}$, $\alpha_0 = 5 \cdot 10^{-3}$, $m = 2.13$, $T_0 = 450\,°\text{C}$, $E = 1.69 \cdot 10^5\,\text{МПа}$, $\sigma_t = 1670\,\text{МПа}$, а також за допомогою результатів роботи [7] знайдемо, що $\alpha_1 = 2.22 \cdot 10^{-6}$, $\alpha_2 = 0.48\,(\text{год})^{-1}$. На основі розрахунків за формулою (20) на рис. 4 побудовано залежність часу до руйнування пластини $t = t_*$ від зміни початкового розміру тріщини ℓ_0. Крива *1* відповідає випадку врахування дії водню, а крива *2* – без урахування впливу водню.

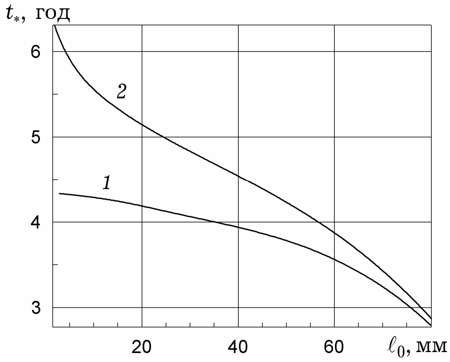

Рис. 4

Пластина з періодичною системою тріщин. Розглянемо нескінченну пластину, послаблену системою періодичних прямолінійних тріщин довжини $2\ell_0$ (центри цих тріщин розміщені на одній лінії на віддалі $2d$ один від одного), яка нагріта до високої температури T_0, що викликає в зонах передруйнування біля вершин тріщин явище високотемпературної повзучості. У нескінченно віддалених точках пластина розтягується рівномірно розподіленими зусиллями p і перебуває під впливом водневмісного середовища, що створює біля вершин тріщин концентрацію C_0 (рис. 5). Рівномірно розподілене навантаження p прикладено так, що напружено-деформований стан у пластині є симетричним відносно лінії розміщення тріщин. Потрібно визначити час $t = t_*$, після досягнення якого тріщини підростуть до критичного розміру $\ell = \ell_*$, і пластина зруйнується.

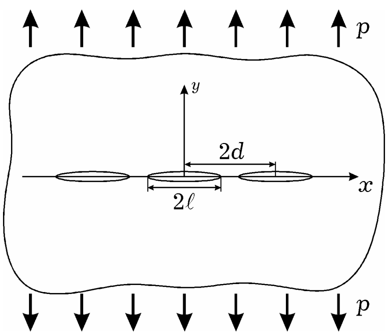

Рис. 5

Цю задачу розв'язували так само, як і попередню. Період $t = t_*$ докритичного росту тріщини обчислювали за формулою (20). При цьому коефіцієнт інтенсивності напружень K_I вибирали у такому вигляді [13]:

$$K_I = \frac{2p\sqrt{\pi\ell}}{\sqrt{(1-\lambda)(4+(\pi^2-4)\lambda)}},$$

де $\lambda = \dfrac{\ell}{d}$. При розв'язуванні задачі використовували для матеріалу пластини дані [6, 7] для сталі 15Х2МФА з тими самими параметрами навантаження і характеристиками матеріалу, що й у попередньому прикладі, при віддалі між центрами тріщин $2d = 0.2\,\text{м}$.

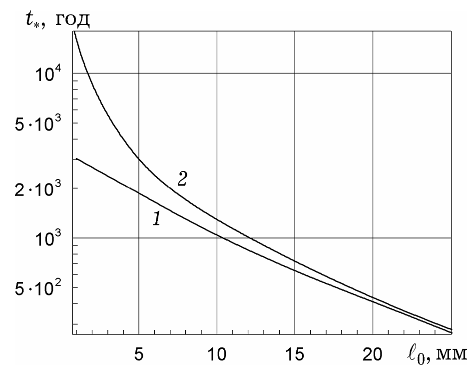

Рис. 6

На основі виконаних за формулою (20) розрахунків на рис. 6 побудовано графіки залежності часу t_* до руйнування пластини з періодичною системою тріщин від початкового розміру тріщини ℓ_0. При цьому крива *1* відповідає випадкові врахування дії водню, а крива *2* – без урахування впливу водню. Бачимо, що при збільшенні початкового розміру тріщини час до руйнування пластини зменшується.

Висновки. На основі енергетичного підходу побудовано розрахункову модель, яка дозволяє визначати залишкову довговічність металевих пластин із системами тріщин при високих температурах і дії водневмісного середовища. Реалізацію запропонованої моделі продемонстровано на розв'язанні задач про довготривалий розтяг пластин з періодичною і двоперіодичною системами тріщин за високої температури та впливу водневмісного середовища. Показано, що водневмісне середовище зменшує залишковий ресурс тонкостінних елементів конструкцій із системами тріщин за довготривалого статичного навантаження і високих температур.

1. *Андрейків О. Є., Гембара О. В.* Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. – Київ: Наук. думка, 2008. – 344 с.
2. *Андрейків О. Є., Кіт М. Б. , Хиль С. В.* Визначення залишкового ресурсу пластини з тріщинами за блочного навантаження // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 4. – С. 62–70.
   Те саме: *Andreikiv O. E., Kit M. B., Khyl' S. V.* Evaluation of the residual life of a cracked plate under block loading // Mater. Sci. – 2012. – **47**, No. 4. – P. 488–498.
3. *Андрейків О. Є., Лесів Р. М., Долінська І. Я.* Залежність періоду докритичного росту повзучо-втомної тріщини від періоду циклу навантаження // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – **45**, № 4. – С. 31–38.
   Те саме: *Andreikiv O. E., Lesiv R. M., Dolins'ka I. Ya.* Dependence of the period of subcritical growth of a creep fatigue crack on the duration of loading cycles // Mater. Sci. – 2009. – **45**, No. 4. – P. 494–503.
4. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б.* Математична модель для визначення періоду докритичного поширення тріщин високотемпературної повзучості в твердих тілах // Доп. НАН України. – 2006. – № 5. – С. 47–52.
5. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б.* Механіка руйнування металевих пластин за високотемпературної повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – **42**, № 2. – С. 62–68.
   Те саме: *Andreikiv O. Ye., Sas N. B.* Fracture mechanics of metallic plates under conditions of high-temperature creep // Mater. Sci. – 2006. – **42**, No. 2. – P. 210–219.
6. *Андрейків О., Добровольська Л., Долінська І., Яворська Н.* Вплив водню на ріст повзучо-втомних тріщин у тонкостінних елементах конструкцій // Вісн. Тернопіль. нац. техн. ун-ту. – 2013. – № 4 (72). – С. 7–15.
7. *Бабій Л., Студент О., Загорський А.* Властивості корпусної сталі 15Х2МФА за умов повзучості у газоподібному водні // Фіз. хім. механіка матеріалів. – 2008. – Спецвипуск № 7: В 2 т. – Т. 1. – С. 100–105.
8. *Локощенко А. М.* Ползучесть и длительная прочность металлов в агрессивных средах (Обзор) // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – **37**, № 4. – С. 27–41.
   Те саме: *Lokoshchenko A. M.* Creep and long-term strength of metals in corrosive media (Review) // Mater. Sci. – 2001. – **37**, No. 4. – P. 559–572.
9. *Мельников Г. П.* Долговечность элементов конструкций в условиях высоких температур при стендовых испытаниях. – Москва: Атомиздат, 1979. – 80 с.
10. *Никитин В. И.* Физико-химические явления при воздействии жидких металлов на твердые. – Москва: Атомиздат, 1967. – 441 с.
11. *Danilov V. L., Zarubin S. V.* Steel creep and creep rupture strength in environment containing hydrogen // Ageing of materials and methods for the assessment of lifetimes of engineering plant: Proc. 4th Int. Colloquium, Cape Town, South Africa (Apr., 21–25, 1997) / Ed. R. K. Penny. – Rotterdam: Balkema, 1997. – P. 113–116.
12. *Garofalo F.* Fundamentals of creep and creep-rupture in metals. – New York–London: MacMillan Co., 1970. – 343 p.
13. *Stress* intensity factors handbook: In 2 Vol. / Ed. Yu. Murakami. – Oxford: Pergamon Press, 1987. – XLIX, XXXIX + 1456 p.
14. *Yatomi M., Nikbin K. M., O'Dowd N. P.* Creep crack growth prediction using a damage based approach // Int. J. Pres. Ves. Pip. – 2003. – **80**, No. 7-8. – P. 573–583.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПЛАСТИН С СИСТЕМАМИ ТРЕЩИН ПРИ ДЕЙСТВИИ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ, ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВОДОРОДА

Сформулированы расчетные модели для определения долговечности пластин с системами трещин при долговременных статических нагрузках, высокой температуры и водородсодержащих сред. Эти модели базируются на первом законе термодинамики баланса энергетических составляющих и скоростей их изменения в металлическом теле, которое содержит макротрещину и подвергнуто действию долговременного растяжения, высокотемпературного поля и водорододосодержащей среды. Рассмотрены конкретные случаи периодической и двупериодической систем трещин.

MATHEMATICAL MODELS FOR ESTIMATION OF RESIDUAL LIFE-TIME OF PLATES WITH CRACKS SYSTEMS UNDER ACTIONS OF LONG DURATION STATIC LOADING, HIGH TEMPERATURE AND HYDROGEN

The calculation models for determination the life-time of plates with the systems of cracks under long duration static loadings, high temperature and environment containing hydrogen are formulated. These models are based on the first law of thermodynamics on energy balance and the balance of energy change rate in a metallic body, containing a macro crack and subjected to long-term loading tension under high-temperature field effect and environment containing hydrogen. The concrete cases of periodic and doubly periodic system of cracks are considered.

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

Одержано
05.01.13