УДК:539.375;539.4:536.543

ПОШИРЕННЯ В МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛАХ ТРІЩИН ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОВЗУЧОСТІ ЗА ДІЇ ВОДНЮ

О. Є. АНДРЕЙКІВ [1], *Л. Н. ДОБРОВОЛЬСЬКА* [2], *Н. В. ЯВОРСЬКА* [1]

[1] *Львівський національний університет ім. Івана Франка;*

[2] *Луцький національний технічний університет*

Запропонована розрахункова модель для визначення впливу водню на докритичний ріст тріщин високотемпературної повзучості в металевих матеріалах. Модель базується на першому законі термодинаміки балансу енергетичних складників та швидкостей їх зміни в металевому тілі, що містить макротріщину і піддане дії довготривалого розтягу, високотемпературного поля і водневовмісного середовища.

Ключові слова: *перший закон термодинаміки, високотемпературна повзучість, концентрація водню, коефіцієнт інтенсивності напружень, зона передруйнування, період докритичного росту водневомеханічних тріщин.*

Проблема водневого окрихчення металевих матеріалів давно в центрі уваги вчених та інженерів. Його аспекти розглядають з різних наукових позицій (див., наприклад, [1–7]). Зокрема, наведено результати експериментальних досліджень впливу водню на деградацію металевих матеріалів, проаналізовано методи розрахунку міцності і довговічності елементів конструкцій за довготривалого статичного і циклічного навантажень у водневовмісних середовищах тощо. Однак недостатньо вивчено вплив водню на поширення тріщин високотемпературної повзучості, що часто є основним механізмом втрати довговічності елементів конструкцій енергетики, літальних апаратів, хімічного, нафтовидобувного, транспортного й інших видів обладнання.

Нижче на основі раніше розробленого [8] енергетичного підходу побудовано розрахункову модель для визначення періоду докритичного росту тріщин високотемпературної повзучості в металевих матеріалах за дії довготривалих статичних навантажень і водневовмісних середовищ.

Постава задачі. Розглянемо металеву пластину, послаблену криволінійною тріщиною довжиною l_0, яка перебуває під дією високої температури T_0 (температура, за якої відбувається високотемпературна повзучість [9]), довготривалого статичного навантаження p та водню, що створює біля вершини тріщини концентрацію C_0 (рис. 1). Тріщина макроскопічна, навантаження розтягу прикладені довільно. Необхідно визначити час $t = t_*$, за досягнення якого тріщина підросте до критичного розміру l_* і пластина зруйнується. В основі розв'язку задачі – енергетичний підхід [8], що ґрунтується на першому законі термодинаміки та рівнянні балансу швидкостей зміни складників енергій, які тут матимуть такий самий вигляд, як і в праці [8]. Тому далі, використовуючи аналогічні міркування, швидкість зміни довжини тріщини подамо у вигляді

$$\frac{dl}{dt} = \left[\frac{\partial W_{pl}^{(2)}}{\partial t} \right]_{t=t_c} \Big/ (\gamma_f - \gamma_t), \qquad (1)$$

Контактна особа: О. Є. АНДРЕЙКІВ, e-mail: andreykiv@ipm.lviv.ua

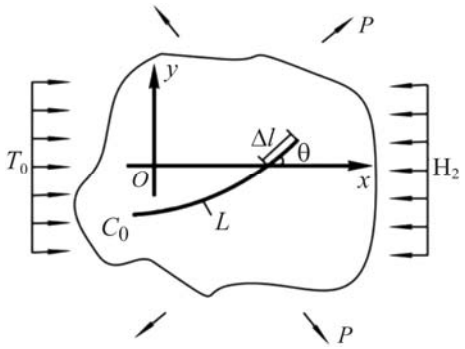

Рис. 1. Схема навантаження пластини з тріщиною.

Fig. 1. Loading mode of a plate with a crack.

де $W_{pl}^{(2)}(t,\theta,C_0)$ – частина енергії, затраченої на пластичне деформування за сталої довжини тріщини під час інкубаційного періоду $t = t_c$ підготовки її стрибка, яка залежить від часу t, концентрації водню C_0 і генерується самим тілом; θ – кут між напрямком поширення тріщини (Δl) і віссю абсцис Ox локальної декартової системи координат Oxy (рис. 1); γ_f – питома енергія руйнування під час поширення тріщини повзучості; γ_t – питома енергія пластичного деформування в зоні передруйнування біля вершини тріщини: $\gamma_t = \sigma_t \delta_{\mathrm{I}t}(0) + \tau_t \delta_{\mathrm{II}t}(0)$, σ_t і τ_t – усереднені нормальні і дотичні напруження в зоні передруйнування, $\delta_{\mathrm{I}t}(0)$ і $\delta_{\mathrm{II}t}(0)$ – нормальне і дотичне розкриття вершини тріщини.

З рівняння (1), вважаючи, як і раніше [8], що тріщина рухається в напрямку $\theta = \theta_*$ максимально можливої швидкості, тобто $(\partial V / \partial\theta = 0)$, отримаємо друге кінетичне рівняння:

$$\frac{\partial}{\partial\theta}\left\{\frac{\partial W_{pl}^{(2)}(t_c,\theta,C_0)}{\partial t}\left(\gamma_f - \gamma_t(l,\theta)\right)^{-1}\right\}_{\theta=\theta_*} = 0. \qquad (2)$$

До рівнянь (1), (2) додаємо початкову і кінцеву умови

$$t = 0, \quad l(0) = l_0, \qquad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*, \qquad (3)$$

де критичну довжину тріщини l_* знайдемо за енергетичним критерієм

$$\gamma_t(l_*) = \gamma_f. \qquad (4)$$

Таким чином, рівняння (1), (2) та умови (3), (4) – розрахункова модель, за якою можна знайти період $t = t_*$ докритичного росту тріщини високотемпературної повзучості в металевих пластинах.

Симетричне розміщення тріщини. Вважаємо, що тріщина в пластині (рис. 1) поширюватиметься вздовж осі Ox, тобто рівняння (2) матиме розв'язок, якщо $\theta_* = 0$, а навантаження p прикладено так, що в пластині виникає напружено-деформований стан, симетричний відносно осі Ox.

Припустимо, що під час підготовки стрибка тріщини більшість часу займатиме усталена повзучість, коли $\dot{\varepsilon}_t = \mathrm{const}$ або $\dot{\delta}_{\mathrm{I}t}(x) = \mathrm{const}$, тому що зона передруйнування пластично деформуватиметься під суттєвими напруженнями σ_t. Тут $\dot{\varepsilon}_t$ – швидкість зміни деформації в зоні передруйнування; $\dot{\delta}_{\mathrm{I}t}(x)$ – швидкість її розкриття. Для усталеної повзучості характеристики ε, δ_t зони передруйнування біля вершини тріщини визначатимемо так:

$$\varepsilon(x,t,C_0) = \varepsilon(x,0) + \dot{\varepsilon}(C_0)t, \quad \delta_{\mathrm{I}t}(x,t,C_0) = \delta_{\mathrm{I}t}(x,0) + \dot{\delta}_{\mathrm{I}t}(C_0)t, \qquad (5)$$

де $\dot{\delta}_{\mathrm{I}t}(C_0)$ – швидкість розкриття вершини тріщини внаслідок високотемпературної повзучості матеріалу в зоні передруйнування за дії водню.

За довготривалого статичного навантаження, високої температури і дії водневовмісного середовища тріщина поширюватиметься повільно стрибками, довжини яких [8]

$$\Delta l \approx \alpha_0 \delta_{It}(0,0,C_0)\,, \tag{6}$$

де α_0 – константа, яку обчислюємо із експерименту.

Оскільки величина Δl достатньо мала, то, очевидно, на такій малій віддалі від вершини швидкість тріщини $\delta_{It}(x, t, C_0)$ змінюється незначно і її наближено по осі x можна вважати константою, тобто $\delta_{It}(x,t,C_0) \approx \delta_{It}(0,t,C_0)$ $(0 \le x \le \Delta l)$.

Тоді на основі формул (5) і (6), а також відомих результатів [8] складники рівняння (1) запишемо так:

$$\gamma_t = \sigma_t \delta_{It}(0,0,0), \qquad \gamma_f = \sigma_t \delta_{IC}\,; \quad W_{pl}^{(2)}(t,C_0) = \alpha_0 \sigma_t \left[\delta_{It}(0,0,0) + \dot{\delta}_{It}(C_0)\cdot t\right]^2, \tag{7}$$

де $\sigma_t = \sigma_{0,2} + 0,5A\varepsilon_t^n$, $\sigma_{0,2}$ – границя текучості, а A, n – параметри істинної діаграми розтягу. Тепер для визначення періоду $t = t_*$ докритичного росту прямолінійної тріщини високотемпературної повзучості з урахуванням дії водневовмісного середовища отримаємо таку математичну модель:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{2\alpha_0[\dot{\delta}_{It}(C_0) + t_c \partial \dot{\delta}_{It}(C_0)/\partial t]}{1 - \delta_{IC}^{-1}\delta_{It}(0,0,0)}, \tag{8}$$

$$t = 0, \quad l(0) = l_0, \qquad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*, \qquad \delta_{It}(l_*) = \delta_{IC}\,.$$

Вплив водню на високотемпературну повзучість конструкційних матеріалів. Швидкість $\dot{\delta}_{It}(C_0)$ пропорційна швидкості $\dot{\varepsilon}_t(C_0)$ деформації на ділянці усталеної повзучості [8]. Між ними існує зв'язок:

$$\dot{\delta}_{It}(C_0) = \delta_{IC}\varepsilon_c^{-1}\dot{\varepsilon}_t(C_0)\,. \tag{9}$$

Виявили, що за малих і середніх концентрацій водню $C_H(t)$ швидкість $\dot{\varepsilon}_t(C_0)$ описує лінійна залежність

$$\dot{\varepsilon}_t(C_0) = \dot{\varepsilon}_t(0)(1 + \alpha_1 C_H(t))\,. \tag{10}$$

Використовуючи відомі результати [3], зміну з часом t концентрації водню $C_H(t)$ у зоні передруйнування для невеликих часів можна також описати лінійною залежністю:

$$C_H(t) = \alpha_2 C_0 t\,. \tag{11}$$

Для сталі 15Х2МФА встановили [10], що α_1 = 2,22 $(\text{ppm})^{-1}$, α_2 = 0,48 h^{-1} і побудували залежність $\dot{\varepsilon}_t \sim C_H$ (рис. 2*a*). Такі ж результати отримано [11] для титанового сплаву ВТ6: α_1 = 3,12 $(\text{mass.}\%)^{-1}$, α_2 = 0,32 h^{-1} (рис. 2*b*). Як бачимо, водень по-різному впливає на високотемпературну повзучість сталі і сплаву. Це можна пояснити так. Високотемпературна повзучість сталі протікає за механізмом дифузії і конденсації вакансій і пороутворення [10]. Водень проникає у пори в атомарному стані, мобілізується там, створюючи високі тиски [3]. Це і призводить до інтенсивного росту пор і збільшення швидкості $\dot{\varepsilon}_t(C_0)$ на усталеній ділянці діаграми (рис. 2*a*).

На основі формул (9)–(11) друге співвідношення (5) запишемо так:

$$\delta_{It}(x,t,C_0) = \delta_{It}(x,0) + \dot{\delta}_{It}(0)t[1 + \alpha_1\alpha_2 C_0 t]\,. \tag{12}$$

Із аналізу результатів праці [11] випливає, що водень, навпаки, знижує швидкість високотемпературної повзучості $\dot{\varepsilon}_t(C_0)$ титанового сплаву (рис. 2*b*). Для багатьох сплавів, у тому числі і ВТ6, високотемпературна повзучість супроводжується переповзанням дислокацій. А так як водень сповільнює їх рух, то знижується і швидкість $\dot{\varepsilon}_t(C_0)$ усталеної повзучості.

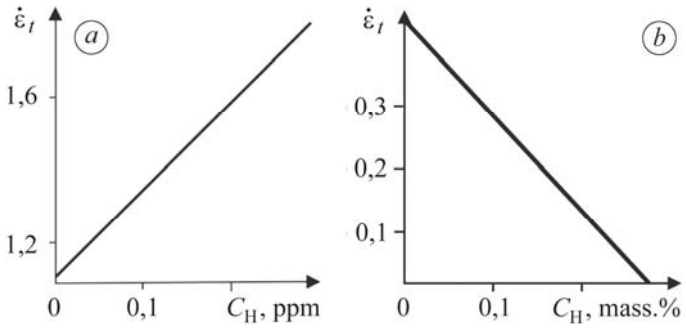

Рис. 2. Залежність швидкості $\dot{\varepsilon}_t$ повзучості на усталеній ділянці від концентрації водню C_H: *a* – для сталі 15Х2МФА; *b* – для титанового сплаву ВТ6.

Fig. 2. Dependence of creep rate $\dot{\varepsilon}_t$ on the defined area on hydrogen concentration C_H: *a* – for 15Х2МФА steel; *b* – for ВТ6 titanium alloy.

Побудова математичної моделі. Підставимо співвідношення (12) у (7) і отримаємо:

$$W_{pl}^{(2)}(t, C_0) = \alpha_0 \sigma_t \left[\delta_{It}(0,0,0) + \dot{\delta}_{It}(0)\, t(1 + \alpha_1 \alpha_2 C_0 t) \right]^2 . \tag{13}$$

Тривалість $t = t_c$ інкубаційного періоду підготовки елементарного стрибка тріщини високотемпературної повзучості визначатимемо так. Вважаємо, що тріщина почне поширюватися, коли максимальне розкриття в зоні передруйнування $\delta_{It}(x, t, C_0)$ досягне критичного значення δ_{IC}, тобто зі співвідношення (12) одержимо рівняння

$$\delta_{IC} - \delta_{It}(x,0) = \dot{\delta}_{It}(0)\, t_c [1 + \alpha_1 \alpha_2 C_0 t_c] . \tag{14}$$

Розв'язуючи його, отримаємо

$$t_c = \frac{-\dot{\delta}_{It} + \sqrt{\dot{\delta}_{It}^2 + 4\dot{\delta}_{Ic}\alpha_1\alpha_2 C_0 (\delta_{IC} - \delta_t)}}{2\dot{\delta}_{It}\alpha_1\alpha_2 C_0} , \tag{15}$$

або для малих значень $\alpha_1\alpha_2 C_0$

$$t_c = \dot{\delta}_{It}^{-1}(\delta_{IC} - \delta_t) . \tag{16}$$

Підставляючи співвідношення (12)–(16) у рівняння (8), для визначення періоду $t = t_*$ докритичного росту тріщини високотемпературної повзучості з урахуванням дії водню отримаємо кінетичне рівняння

$$\frac{dl}{dt} = \frac{2\alpha_0 \dot{\delta}_{It}(0)}{1 - \delta_{IC}^{-1}\delta_{It}(0,0,0)} + 4\alpha_0\alpha_1\alpha_2\delta_{IC}C_0 \tag{17}$$

з початковими і кінцевими умовами

$$t = 0, \quad l(0) = l_0, \qquad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*, \qquad \delta_{It}(l_*) = \delta_{IC} . \tag{18}$$

Якщо тріщина макроскопічна і виконуються рівності $\delta_{It} = K_I^2 (\sigma_t E)^{-1}$, $\delta_{It}\delta_{IC}^{-1} = K_I^2 K_{IC}^{-2}$, математична модель (17), (18) набуде вигляду

$$\frac{dl}{dt} = \frac{2\alpha_0 \dot{\delta}_{It}(0)}{1 - K_I^2 K_{IC}^{-2}} + 4\alpha_0\alpha_1\alpha_2 K_I^2 (\sigma_t E)^{-1} C_0 , \tag{19}$$

$$t = 0, \quad l(0) = l_0, \qquad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*, \qquad K_I(l_*) = K_{IC} . \tag{20}$$

Тут $\dot{\delta}_{It}(0)$ – швидкість розкриття вершини тріщини за високотемпературної повзучості зони передруйнування. Подамо її, як і в праці [8]:

$$2\alpha_0\, \dot{\delta}_{It}(0) = A_{2t} (K_I K_{IC}^{-1})^{2m} , \tag{21}$$

де A_{2t}, m – характеристики високотемпературної повзучості матеріалу, які визначають із експерименту. З урахуванням співвідношення (21) задачу (19), (20) запишемо так:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{A_{2t}(K_{\mathrm{I}}K_{\mathrm{IC}}^{-1})^{2m}}{1-K_{\mathrm{I}}^2K_{\mathrm{IC}}^{-2}} + 4\alpha_0\alpha_1\alpha_2K_{\mathrm{I}}^2(\sigma_tE)^{-1}C_0\,, \tag{22}$$

$$t=0,\quad l(0)=l_0,\qquad t=t_*,\quad l(t_*)=l_*,\qquad K_{\mathrm{I}}(l_*)=K_{\mathrm{IC}}\,. \tag{23}$$

Отже, якщо відомі характеристики α_0, α_1, α_2, K_{IC}, σ_t, E, C_0, m, A_{2t}, то період $t = t_*$ докритичного росту в металевій пластині тріщини високотемпературної повзучості за дії водневовмісного середовища знаходимо за математичною моделлю (22), (23).

Аналог задачі Ґріффітса. Розглянемо нескінченну пластину з прямолінійною тріщиною завдовжки $2l_0$, яка розтягається перпендикулярно до лінії розміщення тріщини в нескінченно віддалених точках довготривалими рівномірно розподіленими зусиллями інтенсивності p і піддана дії водневовмісного середовища і високій сталій температурі T, яка викликає в зонах передруйнування біля вершин тріщини високотемпературну повзучість (рис. 3). Необхідно визначити період $t = t_*$ докритичного росту в пластині тріщини високотемпературної повзучості, за який вона досягне критичного розміру $l(t_*) = l_*$ і пластина зруйнується.

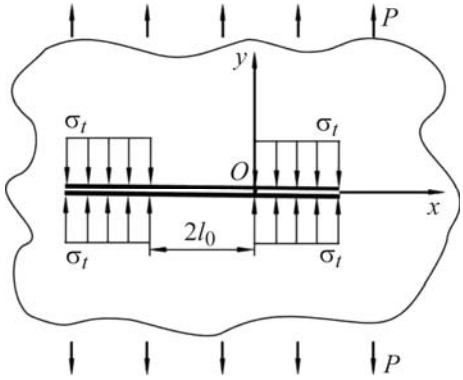

Рис. 3. Схема навантаження пластини з тріщиною в задачі Ґріффітса.

Fig. 3. Loading mode of a plate with a crack in Griffith problem.

Розв'язуватимемо задачу з допомогою математичної моделі (22), (23), де замість коефіцієнта інтенсивності напружень підставимо його значення для задачі Ґріффітса:

$$K_{\mathrm{I}} = p\sqrt{\pi l}\,. \tag{24}$$

Тепер модель (22), (23) набуде вигляду

$$\frac{dl}{dt} = \frac{A_{2t}(\pi lp^2K_{\mathrm{IC}}^{-2})^m}{1-\pi lp^2K_{\mathrm{IC}}^{-2}} + 4\alpha_0\alpha_1\alpha_2\pi lp^2(\sigma_tE)^{-1}C_0 \tag{25}$$

з початковими і кінцевими умовами

$$t=0,\quad l(0)=l_0,\qquad t=t_*,\quad l(t_*)=l_*,\qquad l_*=\pi^{-1}K_{IC}^2p^{-2}\,. \tag{26}$$

Інтегруючи рівняння (25) за початкових і кінцевих умов (26), для обчислення періоду $t = t_*$ отримаємо формулу

$$t_* = \int_{l_0}^{l_*} \frac{(1-\pi p^2lK_{\mathrm{IC}}^{-2})dl}{A_{2t}(\pi p^2l)^mK_{\mathrm{IC}}^{-2m} + 4\cdot\alpha_0\cdot\alpha_1\cdot\alpha_2\cdot\sigma_t^{-1}\cdot E^{-1}\cdot C_0\cdot K_{\mathrm{IC}}^2(1-\pi p^2lK_{\mathrm{IC}}^{-2})} \tag{27}$$

і застосуємо її для визначення залежності цього періоду (аналог задачі Ґріффітса) від початкового розміру тріщини l_0 в пластині зі сталі 15Х2МФА [10] і сплаву ВТ6 [11]. Для сталі прийняли: C_0 = 0,9 ppm, p = 100 MPa, $A_{2t} = 3{,}56\cdot10^{-3}$ m/h, T = 450°C, σ_t = 1670 MPa, m = 2,13, K_{IC} = 210 MPa·$\sqrt{\mathrm{m}}$ [10, 12]; для сплаву: C_0 = 0,3 mass.%, A_{2t} = 0,012 m/h, T = 600°C, p = 300 MPa, m = 2, K_{IC} = 56 MPa·$\sqrt{\mathrm{m}}$ [11, 13]. Враховуючи ці характеристики, побудували (рис. 4) залежності $t_* \sim l_0$ з урахуванням (крива *1*) і без (крива *2*) дії водню. Як бачимо, водневовмісне середовище зменшує період докритичного росту тріщин високотемпературної повзучості в пластинах (залишковий ресурс тонкостінних елементів конструкцій) зі сталі, а з титанового сплаву – збільшує. Це пов'язано з тим, що високотемпературна повзучість

для цих матеріалів протікає по-різному. Для сталі – за механізмом дифузії і конденсації вакансій, а також росту пор, що стимулює дифузійно рухливий водень. Тому водень збільшує швидкість поширення тріщини високотемпературної повзучості і зменшує залишковий ресурс пластини. Для титанового сплаву ВТ6 – за механізмом переповзання дислокацій із паралельних смуг ковзання, рух яких водень сповільнює, що і призводить до росту залишкового ресурсу пластини.

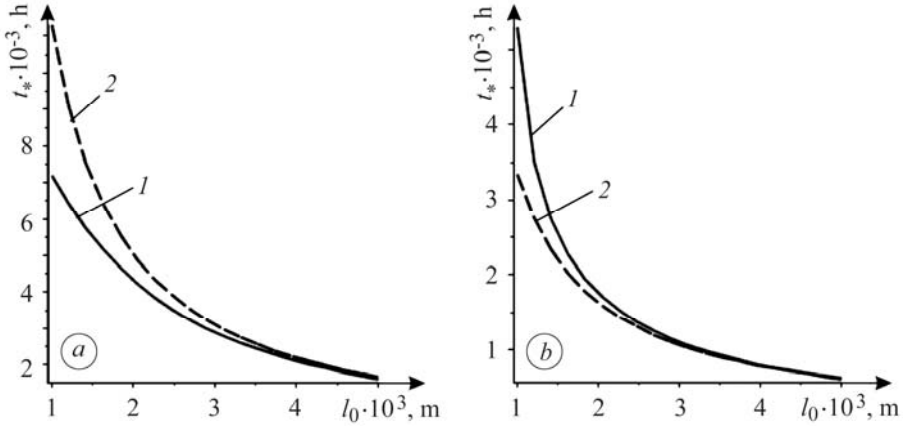

Рис. 4. Залежність періоду t_* докритичного росту в пластині тріщини високотемпературної повзучості від її початкового розміру l_0: *a* – для сталі 15Х2МФА; *b* – для титанового сплаву ВТ6 (*1* – за дії водню; *2* – без водню).

Fig. 4. Dependence of subcritical growth period t_* in the high temperature creep crack plate on its initial size l_0: *a* – for 15Х2МФА steel; *b* – for BT6 titanium alloy (*1* – under hydrogen action; *2* – without hydrogen).

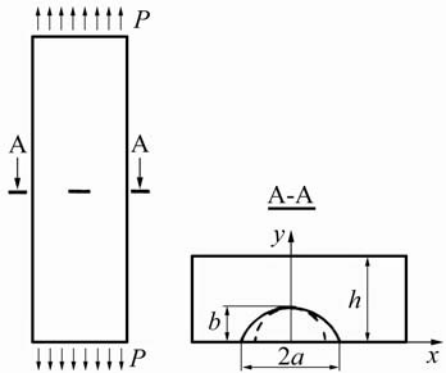

Рис. 5. Схеми навантаження і геометричних розмірів пластини з поверхневою тріщиною.

Fig. 5. Schemes of loading and geometric sizes of the plate with a surface crack.

Визначення залишкового ресурсу пластини з поверхневою тріщиною. В елементах конструкцій енергетичного устаткування, хімії і нафтохімії застосовують товстостінні ємності, які часто піддані дії довготривалих статичних навантажень, високих температур і воднево-вмісних середовищ. У їх стінках через недосконалі технології виготовлення, а також тривалість експлуатації виникають поверхневі тріщини, які виявляють під час профілактичних оглядів і діагностики методами неруйнівного контролю. Постає питання, який залишковий ресурс такого елемента конструкції з тріщиною і чи не зруйнується він до чергового планового профілактичного огляду.

Так як товщини таких елементів конструкцій і параметри поверхневих тріщин набагато менші від інших геометричних розмірів, то кінетика поширення в них поверхневих тріщин буде наближено така ж, як і в нескінченній пластині такої самої товщини. З цією метою і розглянемо задачу про визначення періоду докритичного росту поверхневої тріщини високотемпературної повзучості в пластині, суть якої ось у чому.

Розглянемо нескінченну пластину товщиною h з поверхневою півеліптичною тріщиною з півосями a, b, яка піддана дії високотемпературного сталого поля, воднево-вмісного середовища і розтягується в нескінченно віддалених точ-

ках довготривалими рівномірно розподіленими зусиллями інтенсивності p, які направлені перпендикулярно до площини розміщення тріщини (рис. 5). Треба визначити такий час $t = t_*$, за який тріщина високотемпературної повзучості досягне протилежної поверхні пластини і ємність, яку моделює пластина з тріщиною, розгерметизується.

Розв'язуємо задачу наближено з допомогою методу еквівалентних площ [14], замінюючи її модельною задачею, в якій півколовий контур тріщини радіуса $\rho = \sqrt{ab}$ обмежує площу, рівну півеліптичній реальній тріщині і вздовж якого вибираємо найбільше значення КІН [15]:

$$K_{\mathrm{I}} = 2p\sqrt{h\pi^{-1}}\, f(\varepsilon),\ f(\varepsilon) = \varepsilon^{0,5}(1,01 + 0,067\varepsilon^3)(1,57 - 0,51e^{-0,21\varepsilon^2})(\varepsilon = \rho h^{-1}). \quad (28)$$

Тоді на основі вище викладеного розв'язок задачі зведемо до інтегрування рівняння

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{A_{2t}h^{-1}(4\pi^{-1}hp^2f^2(\varepsilon)K_{IC}^{-2})^m}{1 - 4\pi^{-1}hp^2f^2(\varepsilon)K_{IC}^{-2}} + 4\alpha_0 h^{-1}\alpha_1\alpha_2\pi lp^2(\sigma_t E)^{-1}C_0 \quad (29)$$

з початковими і кінцевими умовами

$$t = 0,\quad \varepsilon(0) = \varepsilon_0;\qquad t = t_*,\quad \varepsilon(t_*) = \varepsilon_*,\qquad f(\varepsilon_*) = 0,5p^{-1}K_{IC}\sqrt{\pi h^{-1}}. \quad (30)$$

Звідси для визначення періоду $t = t_*$ докритичного росту в пластині тріщини високотемпературної повзучості отримаємо формулу

$$t_* = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_*} \frac{h(1 - 4\pi^{-1}p^2hf^2(\varepsilon)K_{IC}^{-2})d\varepsilon}{A_{2t}(4\pi^{-1}p^2hf^2(\varepsilon))^m K_{IC}^{-2m} + 4\alpha_0\alpha_1\alpha_2\sigma_t^{-1}E^{-1}C_0K_{IC}^2(1 - 4\pi^{-1}p^2hf^2(\varepsilon)K_{IC}^{-2})}. \quad (31)$$

Розглянемо випадок, коли пластина виготовлена зі сталі 15Х2МФА, для якої задамо такі характеристики і навантаження: m = 2,13, $\alpha_0 = 5\cdot10^{-3}$, α_1 = = 2,22 (ppm)$^{-1}$, α_2 = 0,48 h^{-1}, T = 450°C, σ_t = 1670 MPa, K_{IC} = 210 MPa$\sqrt{\text{m}}$, A_{2t} = 3,56·10^{-3} m/h, h = 0,10 m, C_0 = = 0,9 ppm, p = 600 MPa. На основі цих даних, а також формули (31) побудували (рис. 6) залежності $t_* \sim \rho_0$ з урахуванням і без дії на пластину водневовмісного середовища, яке скорочує період $t = t_*$ докритичного росту тріщини високотемпературної повзучості (залишковий ресурс) у пластині.

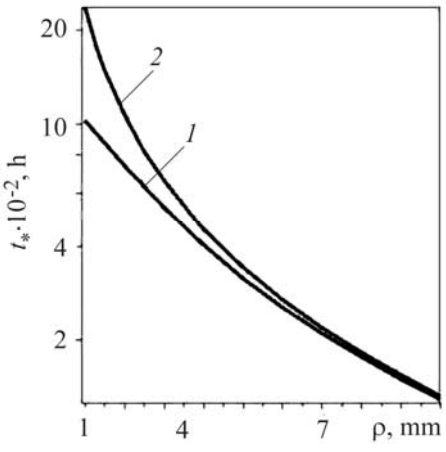

Рис. 6. Залежність часу до руйнування від радіуса контуру тріщини для пластини зі сталі 15Х2МФА: *1* – з урахуванням дії водню; *2* – без урахування.

Fig. 6. Dependence t_* versus ρ_0 for 15Х2МФА steel plate: *1* – under hydrogen effect; *2* – without hydrogen.

ВИСНОВКИ

Побудована математична модель для визначення залишкового ресурсу металевих елементів конструкцій з тріщинами за довготривалого статичного навантаження, високої температури і дії водневовмісних середовищ. З її допомогою вивчено довготривалий розтяг пластини з тріщиною за високої температури і дії водневовмісних середовищ. Використовували сталь 15Х2МФА і титановий сплав ВТ6. Виявили, що швидкість росту тріщини в сталі більша, а залишкова довговічність менша, для сплаву ВТ6, навпаки, швидкість росту тріщини менша, а залишкова довговічність більша.

РЕЗЮМЕ. Предложена расчетная модель для определения влияния водорода на докритический рост трещин высокотемпературной ползучести в металлических материалах. Модель базируется на первом законе термодинамики баланса энергетических составляющих и скоростей их изменения в металлическом теле, которое содержит макротрещину и подвергнуто воздействию долговременного растяжения, высокотемпературного поля и водородсодержащей среды.

SUMMARY. The calculation model for evaluation of the influence of hydrogen on the high-temperature subcritical creep crack growth in metallic materials is proposed. The model is based on the first low of thermodynamics of energy balance and the rates of energy balance change in a metallic body, containing a macrocrack and subjected to long-term static loading tension under high-temperature field effect and hydrogen-containing environment.

1. *Murakami Yu.* Effect of hydrogen on fatigue crack growth in metals // Proc. 17th Eur. Conf. on Fracture (ECF-17) "Multilevel Approach to Fracture of Materials, Components and Structures". – Brno (Czech Republic), 2008. – P. 25−42.
2. *The specific* of the creep process in hydrogen of the degraded in service 2.25Cr–Mo steel / A. Zagórski, O. Student, L. Babiy et al. // Ibid. – P. 2300−2307.
3. *Андрейків О. Є., Гембара О. В.* Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневовмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2007. – 344 с.
4. *Андрейків О. Є., Никифорчин Г. М., Ткачов В. І.* Міцність і руйнування металевих матеріалів і елементів конструкцій у водневовмісних середовищах // Фізико-механічний інститут: поступ і здобутки / Під ред. В. В. Панасюка. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. – С. 248–286.
5. *Андрейків О. Є.* Довговічність металевих матеріалів у водневовмісних середовищах // Прогресивні матеріали і технології. – 2003. – № 2. – С. 423–439.
6. *Influence* of hydrogen-containing environments on fatigue crack extension resistance of metals / V. V. Panasyuk, O. Ye. Andreykiv, O. I. Darchuk, and N. V. Kuznyak // Handbook of Fracture Crack Propagation in Metallic Structures. – Amsterdam: Elsevier, 1994. – **2**. – P. 1205–1242.
7. *Panasyuk V. V., Andreykiv O. Ye., and Gembara O. V.* Hydrogen degradation of materials under long-term operation of technological equipment // Int. J. Hydrogen Energy. – 2000. – № 25. – P. 67–74.
8. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б.* Механіка руйнування металічних пластин при високотемпературній повзучості // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. − **42**, №2. – С. 62−68.
(*Andreikiv O. E. and Sas N. B.* Fracture mechanics of metallic plates under the conditions of high-temperature creep // Materials Science. – 2006. – **42**, № 2. – P. 210–219.)
9. *Garofalo F.* Fundamentals of creep and creep-rupture in metals. – New York; London: Mac Millan Company, 1970. – 344 p.
10. *Бабій Л., Студент О., Загорський А.* Властивості корпусної сталі 15Х2МФА за умов повзучості у газоподібному водні // Фіз. хім. механіка матеріалів. – 2008. – Т. 1, спецвип. № 7. – С. 100–105.
11. *Анализ* ползучести и длительной прочности титанового сплава ВТ6 с предварительно внедренным водородом / А. М. Локощенко, А. А. Ильин, А. М. Мамонов, В. В. Назаров // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. − № 5. – С. 98−104.
12. *Хромченко Ф. А.* Ресурс сварных соединений паропроводов. – М.: Машиностроение, 2002. – 352 с.
13. *Локощенко А. М.* Ползучесть и длительная прочность металлов в агрессивных средах (Обзор) // Фіз. хім. механіка матеріалів. – 2001. – **37**, № 4. – С. 27–41.
(*Lokoshchenko A. M.* Creep and long-term strength of metals in corrosive media (Review) // Materials Science. – 2001. – **37**, № 4. – P. 559–572.)
14. *Андрейків О. Є., Сас Н. Б.* Докритичний ріст плоскої тріщини в тривимірному тілі за високотемпературної повзучості // Там же. – 2008. − **44**, № 2. – С. 19–26.
(*Andreikiv O. E., and Sas N. B.* Subcritical growth of a plane crack in a three-dimensional body under the conditions of high-temperature creep // Materials Science. – 2008. – **44**, № 2. – P. 163–174.)
15. *Справочник* по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х т. / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990.

Одержано 06.06.2013