

УДК: 539:431,434;669.788

О. Андрейків², докт. техн. наук; Л. Добровольська³, канд. техн. наук;

І. Долінська¹, канд. фіз.-мат. наук; Н. Яворська²;

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

²Львівський національний університет ім. І. Франка

³Луцький національний технічний університет

ВПЛИВ ВОДНЮ НА РІСТ ПОВЗУЧО-ВТОМНИХ ТРІЩИН У ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЙ

Резюме. Побудовано математичну модель для визначення впливу водню на ріст повзучо-втомних тріщин у тонкостінних елементах конструкцій за змінних у часі навантажень і високих температур. На основі цього досліджено відповідний аналог задачі Гріффітса, де встановлено, що неврахування впливу водню у докритичному рості повзучо-втомної тріщини може призвести до переоцінювання залишкової довговічності пластини і до непередбачуваного руйнування.

Ключові слова: повзучо-втомна тріщина, високотемпературна повзучість, концентрація водню, залишкова довговічність.

O. Andreykiv, I. Dolinska, N. Yavorska, L. Dobrovolska

THE INFLUENCE OF HYDROGEN ON THE CREEP-FATIGUE CRACK GROWTH IN THIN-WALLED STRUCTURAL ELEMENTS

Summary. The mathematical model for determination of influence of hydrogen on the creep-fatigue crack growth in thin-walled structural elements under the variable in time loading and high temperatures has been built. (Temperature of structural elements is higher than half melting points of material. This temperature will facilitate emergence of high-temperature creep in the plastic zone near the crack tip). It is based on the first law of thermodynamics concerning mechanics of solid slow fracture at high temperature creep, variable loading and environment containing hydrogen. It is assumed, that the period of unsteady creep dominates here. In this case the main mechanism of fracture is creep-fatigue fracture and hydrogen only intensifies or weakens this process. We assume that crack propagation occurs by jumps during incubation periods of high temperature creep in the prefracture zone near the crack tip. Then the crack growth rate can be represented as the average ratio of the length and its jump to the time of incubation period. Considering this and equation the rate of change of energy balance an equation to determine the growth rate of creep-fatigue macrocrack is obtained. This equation with the initial and final conditions is a mathematical model for determining the period of subcritical creep-fatigue crack growth in terms of environment containing hydrogen. On this basis the influence of hydrogen on the residual life-time of thin-walled plate made of steel 321 with a straight crack (analogue of Griffiths problem) under cyclic loads and high-temperature creep was determined. The dependence of the residual life-time of the plate on the initial defect size for the cases of account and not account operating on plate environment containing hydrogen has been graphically constructed. It is shown that the hydrogen increases of creep-fatigue crack propagation rate, which reduces the life-time of the plate. So ignoring of influence of hydrogen in the subcritical of creep-fatigue crack can result in reevaluation of residual life-time of the plate and not to predict fracture.

Key words: creep-fatigue crack, high temperature creep, concentration of hydrogen, residual life-time.

Вступ. Відомо, що повзучо-втомне руйнування є причиною експлуатаційних пошкоджень переважної більшості сучасних інженерних споруд. За статистикою [1] вклад повзучо-втомних пошкоджень елементів металоконструкцій становить 40% від загальної кількості їх передчасних відмов. Однак, коли такі елементи конструкцій працюють під впливом водню, дія якого полегшує зародження та поширення повзучо-втомних тріщин, їх загальна довговічність значно знижується. Тому важливо вивчати вплив водню на розповсюдження таких дефектів.

На даний час у літературі [2 – 7] відома низка експериментальних та теоретичних досліджень руйнування металевих матеріалів за дії водневмісного середовища. Тут запропоновано різні розрахункові моделі, методи та критерії оцінювання впливу водню на довговічність елементів конструкцій за довготривалих циклічних і статичних навантажень. Однак за сумісної дії водню, циклічних навантажень і високих температур, коли виникає високотемпературна повзучість, що призводить до повзучо-втомного руйнування таких досліджень є недостатньо.

Нижче запропоновано математичну модель, яка описує поширення повзучо-втомної тріщини в тонкостінних елементах конструкцій за дії водневмісного середовища і дає можливість визначити час її докритичного росту.

Постановка задачі й метод її розв’язання. Розглянемо пластину, послаблену прямолінійною тріщиною початкової довжини l_0 , яка навантажена циклічно з амплітудою p і витримкою в циклі t_* за високої температури T_0 , що викликає в зоні передруйнування біля вершини тріщини високотемпературну повзучість (рис. 1). Разом з тим, пластина перебуває під дією водневмісного середовища, що створює біля вершини тріщини концентрацію водню C_0 . Зовнішні навантаження розтягу з амплітудою p прикладені так, що напружено-деформований стан у пластині симетричний відносно площини розміщення тріщини. Задача полягає у визначенні періоду $N = N_*$ докритичного росту повзучо-втомної тріщини (залишковий ресурс).

Розв’язок даної задачі отримаємо на основі раніше запропонованого авторами енергетичного підходу [8], в основу якого покладено перший закон термодинаміки щодо балансу енергетичних складових та балансу швидкостей їх зміни. У даному випадку, вважаємо, що основним механізмом руйнування є повзучо-втомне руйнування, а водень тільки інтенсифікує або послаблює цей процес.

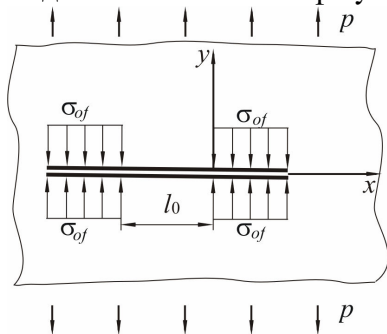


Рисунок 1. Схема навантаження пластини з тріщиною

Figure 1. Scheme of a plate with crack loading

на відрізку просування тріщини на величину Δl_c , яку запишемо

Рівняння енергетичного балансу для елементарного акту просування тріщини запишемо

$$Q + A = W + \Gamma + K. \quad (1)$$

Тут $Q = const$ – величина теплової енергії; A – робота зовнішніх сил; Γ – енергія руйнування пластини, яка залежить тільки від довжини тріщини l ; K – кінетична енергія, яка в цьому випадку за малих швидкостей навантаження пластини буде незначна і нею будемо нехтувати при обчисленнях; W – енергія деформування зони передруйнування

$$W = W_s + W_p^{(0)}(l) + W_p^{(1)}(t) - W_p^{(2)}(t) - W_p^{(3)}(t) - W_p^{(4)}(t), \quad (2)$$

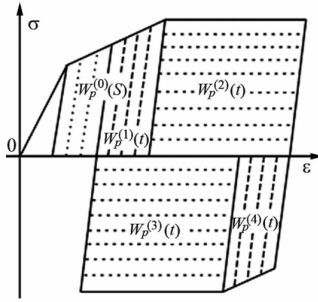


Рисунок 2. Схема деформування зони передруйнування впродовж одного циклу навантаження і розподіл відповідних енергетичних компонентів

Figure 2. Scheme of the process zone deformation during one loading cycle, and distribution of corresponding energy constituents

де W_s – пружна складова енергії W ; $W_p^{(0)}(l)$ – частина роботи пластичних деформацій у зоні передруйнування при її статичному розтязі, яка залежить тільки від довжини тріщини l (рис. 2); $W_p^{(1)}(t)$ – частина роботи пластичних деформацій від зовнішніх зусиль при зростанні навантаження в циклі розтягу зони передруйнування, що залежить від часу t ; $W_p^{(2)}(t)$ – частина роботи пластичних деформацій за постійної довжини тріщини під час повзучості зони передруйнування біля вершини тріщини за розтягу і витримки в циклі, що залежить тільки від часу t і концентрації водню C_0 ; $W_p^{(3)}(t)$ – частина роботи пластичних деформацій під час повзучості при розвантаженні пластини, тобто стиску зони передруйнування за витримки в циклі, яка також виділяється за постійної довжини тріщини, генерується самою пластиною і залежить тільки від t і концентрації водню C_0 ; $W_p^{(4)}(t)$ – частина роботи пластичних деформацій, яка генерується самою пластиною під час її розвантаження і статичного стиску зони передруйнування, залежить від концентрації водню C_0 .

Враховуючи сказане вище і диференціюючи за часом t компоненти рівняння енергетичного балансу (1), отримуємо рівняння балансу швидкостей зміни енергетичних складових

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma}{\partial t}. \quad (3)$$

Для спрощення формулювання математичної моделі будемо вважати, що в зонах циклу розтягу і стиску енергії повзучості $W_p^{(2)}(t)$ і $W_p^{(3)}(t)$ незначно відрізняються, тобто $W_p^{(2)}(t) \approx W_p^{(3)}(t)$. Враховуючи, що компоненти енергії деформування є складні функції від l і t , а довжина тріщини l неявно залежить від часу t і підставляючи вираз (2) в (3), отримуємо

$$\frac{\partial}{\partial l} \left[\Gamma - (A - W_s - W_p^{(0)} - W_p^{(1)}) \right] \frac{dl}{dt} - \frac{\partial (W_p^{(4)}(t, C_0) + 2W_p^{(3)}(t, C_0))}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

Із рівняння (4) визначимо величину швидкості поширення тріщини

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\partial (W_p^{(4)}(t, C_0) + 2W_p^{(3)}(t, C_0))}{\partial t} \bigg/ \frac{\partial \left[\Gamma - (A - W_s - W_p^{(0)} - W_p^{(1)}) \right]}{\partial l}. \quad (5)$$

Використовуючи результати робіт [8, 9], похідну від виразу в квадратних дужках у правій частині рівняння (5) запишемо у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial t} [\Gamma - (A - W_s - W_p^{(0)} - W_p^{(1)})] = \gamma_{fC} - \gamma_t, \quad (6)$$

де $\gamma_t = \sigma_{0f} \delta_{t\max}(x, t)$ – питома робота пластичних деформацій у зоні передруйнування за росту повзучо-втомної тріщини; $\gamma_{fC} = \sigma_{0f} \delta_{fC}$ – її критичне значення; $\delta_{t\max}(x, t)$ – максимальне за цикл розкриття $\delta_t(x, t)$ тріщини в її вершині при усередненому напруженні σ_{0f} у зоні передруйнування; δ_{fC} – критичне значення розкриття $\delta_t(x, t)$.

Підставивши формулу (6) в (5), отримаємо

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\partial(W_p^{(4)}(t, C_0) + 2W_p^{(3)}(t, C_0))}{\partial t} / (\gamma_{fC} - \gamma_t). \quad (7)$$

Оскільки ми розглядаємо випадок циклічного навантаження, то подамо швидкість росту тріщини в одиницях циклу. Для цього помножимо рівняння (7) на період t_* циклу навантаження, при цьому вважаємо, що $dt = t_* \cdot dN$.

Вважатимемо, що впродовж витримки кожного циклу t_* навантаження в зоні передруйнування протікає високотемпературна повзучість матеріалу. Так як ми розглядаємо практичні часи витримок, тобто t_* не є досить велике [10], то основну долю часу буде займати перша ділянка діаграми повзучості, для якої характерним є зменшення швидкості повзучості (так звана неусталена повзучість [10]). На основі відомих [11] результатів експериментальних досліджень впливає, що навіть при достатньо великих значеннях витримки в циклі t_* енергія деформування за повзучості є малою величиною порівняно із енергією деформування за втоми (тобто $\partial W_p^{(3)} / \partial N \ll \partial W_p^{(4)} / \partial N$) і надалі при обчисленнях нею будемо нехтувати. Тоді рівняння (7) набуде вигляду

$$\frac{dl}{dN} = \frac{\partial W_p^{(4)}(t, C_0)}{\partial N} / (\gamma_{fC} - \gamma_t). \quad (8)$$

Для повноти математичної моделі додамо до рівняння (8) початкову (9) і кінцеву (10) умови, відповідно

$$N = 0, \quad l(0) = l_0. \quad (9)$$

$$N = N_*(t_*), \quad l(N_*(t_*)) = l_*. \quad (10)$$

Тут критичне значення довжини тріщини будемо визначати з енергетичного критерію

$$\gamma_t(l_*) = \gamma_{fC}. \quad (11)$$

Таким чином, кінетичне рівняння (8) та умови (9) – (11) складають математичну модель для визначення докритичного росту повзучо-втомної тріщини в тонкостінних елементах конструкції під дією циклічного розтягу.

Оскільки розглядається неусталена повзучість, то, використовуючи логарифмічний закон повзучості [10] розкриття $\delta_{t_{\max}}(x, C_H)$ зони перед руйнування, запишемо таким чином:

$$\delta_{t_{\max}}(x, C_H) = \delta_{t_{\max}}(x, 0) + B_H(C_H) \cdot \ln\left(\frac{t_0 + t_*}{t_1}\right), \quad (12)$$

де B_H , t_1 – константи, які визначаються із експерименту; $\delta_{t_{\max}}(x, 0)$ – максимальне розкриття зони передруйнування на початку циклу навантаження; $B_H(C_H) \cdot \ln\left(\frac{t_0 + t_*}{t_1}\right)$ – додаткове розкриття зони передруйнування за рахунок повзучості в умовах дії водню протягом циклу навантаження; $t_0 = 1$ год.; x – координата вздовж лінії тріщини і початком у її вершині; t_* – період витримки в циклі.

Аналогічною, як це було зазначено в праці [8], величину l_c елементарного просування тріщини можемо наближено визначити так:

$$l_c \approx \alpha_0 \Delta \delta_t(0, C_H) = \alpha_0 [\delta_{t_{\max}}(0, C_H) - \delta_{t_{\min}}(0, C_H)],$$

де α_0 – константа, що визначається із експерименту; $\delta_{t_{\min}}(0, C_H)$ – мінімальне значення розкриття $\delta_t(0, C_H)$ за цикл.

Так як і в [8], припускаємо, що величина l_c є достатньо мала, то, очевидно, на такій малій відстані від вершини тріщини величина $\delta_t(x)$ змінюється незначно і її наближено по x можна вважати константою, тобто

$$\delta_t(x, C_H) \approx \delta_t(0, C_H) \text{ при } (0 \leq x \leq x_*).$$

За такої умови енергія деформування $W_p^{(4)}$ з урахуванням результатів праці [8] запишемо у вигляді

$$W_p^{(4)}(C_H) = \alpha_0 N \sigma_{0f} \left([\delta_{t_{\max}}(0, C_H) - \delta_{t_{\min}}(0, C_H)]^2 - [\delta_{th_{\max}}(0, C_H) - \delta_{th_{\min}}(0, C_H)]^2 \right), \quad (13)$$

де $\delta_{th_{\max}}(0, C_H)$, $\delta_{th_{\min}}(0, C_H)$ – максимальне і мінімальне нижнє порогове значення розкриття $\delta_t(0, C_H)$ вершини тріщини, нижче яких нема повзучо-втомного руйнування.

З використанням співвідношення (12) різницю розкриття зони передруйнування, що входить у формулу (13), запишемо, аналогічно як в праці [8],

$$\delta_{t_{\max}}(x, C_H) - \delta_{t_{\min}}(x, C_H) = 0,5 \left(\delta_{t_{\max}}(x, 0) + B_H(C_H) \ln\left(\frac{t_0 + t_*}{t_1}\right) \right) (1 - R)^2, \quad (14)$$

де $\frac{\delta_{t_{\min}}}{\delta_{t_{\max}}} = 1 - 0,5(1 - R)^2$, R – коефіцієнт асиметрії циклу.

Із виразу (12) випливає, що $B_H(C_H) = \dot{\delta}_{Ht_{\max}}(x, C_H) t_0$,

де $\dot{\delta}_{Ht \max}(x, C_H)$ – швидкість розкриття у вершині тріщини за повзучості і водневмісного середовища в зоні передруйнування. Постає питання, як визначити невідому величину $\dot{\delta}_{Ht \max}(x, C_H)$. Для цього поступаємо наступним чином. Для першої і другої ділянки діаграми повзучості в літературі відомі співвідношення для визначення деформації [10]

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + v_1 t + v_2 \ln \frac{t_0 + t}{t_1}; \quad \dot{\varepsilon}(t) = v_1 + v_2 \frac{1}{t_0 + t}, \quad (15)$$

де v_1 – швидкість усталеної повзучості; v_2 – початкова швидкість повзучості. Із результатів праці [10] відомо, що між v_1 і v_2 існує залежність

$$v_2 \approx \alpha v_1, \quad (16)$$

тобто на основі (15) і (16) можна записати

$$\dot{\varepsilon}(0) = \alpha_1 v_1, \quad \alpha_1 = (1 + \alpha). \quad (17)$$

Разом з тим, як показують результати експериментальних досліджень [12, 13], для малих і середніх концентрацій водню $C_H(t)$ величину $v_1(C_H)$ можна представити залежністю

$$v_1(C_H) = v_1(0)(1 + \beta_1 C_H), \quad (18)$$

де C_H – концентрація водню в точці зони передруйнування, в якій починається руйнування. Згідно з результатами праці [4], для малих і середніх концентрацій водню зміну величини C_H з часом t у місці максимальної деформації зони передруйнування можна представити лінійною залежністю

$$C_H = \beta_2 C_0 t, \quad (19)$$

де β_1, β_2 – константи, які визначають із експерименту. На основі (18) і (19) (17) можна записати так:

$$\dot{\varepsilon}_H(C_H) = \dot{\varepsilon}(0)(1 + \beta_1 \beta_2 C_0 t). \quad (20)$$

Враховуючи, що між величиною деформації в зоні передруйнування $\varepsilon(t)$ і величиною розкриття у вершині тріщини $\delta(t)$ існує прямолінійна залежність [14], тобто $\varepsilon(t) \sim \delta_t(t)$, величину швидкості розкриття $\dot{\delta}_{Ht \max}(x, C_H)$ у вершині тріщини запишемо

$$\dot{\delta}_{Ht \max}(0, C_H) = \dot{\delta}_{t \max}(0, 0) \cdot (1 + \beta_1 \beta_2 C_0 t), \quad (21)$$

де $\dot{\delta}_{t \max}(0, 0)$ – швидкість розкриття тріщини за усталеної повзучості.

Аналогічно, як це було запропоновано в праці [15], швидкість розкриття вершини тріщини за усталеної повзучості можна представити залежністю

$$\dot{\delta}_{t \max} = A_1 [\delta_{t \max} \delta_{fC}^{-1}]^m, \quad (22)$$

де A_1 , m – константи високотемпературної повзучості, які знаходимо із експерименту.

На основі співвідношень (21), (22), вираз (14) запишемо

$$\delta_{t \max}(x, C_H) - \delta_{t \min}(x, C_H) = 0,5 \left(\delta_{t \max}(x, 0) + A_1 t_0 [\delta_{t \max} \delta_{fC}^{-1}]^m (1 + \beta_1 \beta_2 C_0 t) \ln \left(\frac{t_0 + t_*}{t_1} \right) \right) (1-R)^2. \quad (23)$$

Підставляючи (23) в (13), отримаємо

$$W_p^{(4)} = 0,25 \alpha_0 N \sigma_{0f} (1-R)^4 \left(\left[\delta_{t \max} + A_1 t_0 [\delta_{t \max} \delta_{fC}^{-1}]^m \cdot (1 + \beta_1 \beta_2 C_0 t_*) \cdot \ln \left(\frac{t_0 + t_*}{t_1} \right) \right]^2 - \left[\delta_{th} + A_1 t_0 [\delta_{th} \delta_{fC}^{-1}]^m \cdot (1 + \beta_1 \beta_2 C_0 t_*) \cdot \ln \left(\frac{t_0 + t_*}{t_1} \right) \right]^2 \right). \quad (24)$$

Використавши (24) і результати роботи [8], рівняння (8) для визначення швидкості поширення повзучо-втомної макротріщини запишемо у вигляді

$$\frac{dl}{dN} = \frac{\alpha_0 (1-R)^4}{4 \sigma_{0f} E} \left(\left[K_{I \max}^2 + A_2 [K_{I \max}^2 K_{fC}^{-2}]^m \cdot (1 + \beta_1 \beta_2 C_0 t_*) \cdot \ln \left(\frac{t_0 + t_*}{t_1} \right) \right]^2 - \left[K_{th}^2 + A_2 [K_{th}^2 K_{fC}^{-2}]^m \cdot (1 + \beta_1 \beta_2 C_0 t_*) \cdot \ln \left(\frac{t_0 + t_*}{t_1} \right) \right]^2 \right) \cdot [K_{fC}^2 - K_{I \max}^2]^{-1}. \quad (25)$$

за початкової і кінцевої умов

$$N = 0, \quad l(0) = l_0; \quad (26)$$

$$N = N_*(t_*), \quad l(N_*(t_*)) = l_*; \quad K_{I \max}(l_*) = K_{fC}, \quad (27)$$

де величину A_2 знаходимо так: $A_2 = A_1 t_0 E \sigma_{0f}$; K_{fC} – критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень $K_{I \max}$; K_{th} – нижнє порогове значення $K_{I \max}$, при якому не відбувається повзучо-втомного руйнування. Таким чином, за відомих характеристик A_1 , m , t_1 , K_{th} , K_{fC} , α_0 , R , β_1 , β_2 , C_0 період докритичного росту повзучо-втомної тріщини за впливу водневмісного середовища визначається співвідношенням (25) – (27).

Вплив водню на залишкову довговічність елемента конструкції на прикладі аналога задачі Гріффітса. Розглянемо пластину зі сталі 321 з початковою прямолінійною тріщиною довжини $2l_0$, під дією водню H_2 , що створює поверхневу концентрацію C_0 біля вершини тріщини, яка нагріта до високої температури, що викликає в зоні передруйнування високотемпературну повзучість. При цьому пластину розтягується в нескінченно віддалених точках рівномірно розподіленими зусиллями інтенсивності p , які змінюються циклічно і спрямовані перпендикулярно до площі розміщення тріщини (рис. 1). Ця задача є аналогом задачі Гріффітса для повзучовтомних тріщин за водневмісного середовища, яка полягає у визначенні кількості циклів навантаження $N = N_*$, з досягненням якого тріщина підросте до критичного розміру $l = l_*$ і пластину

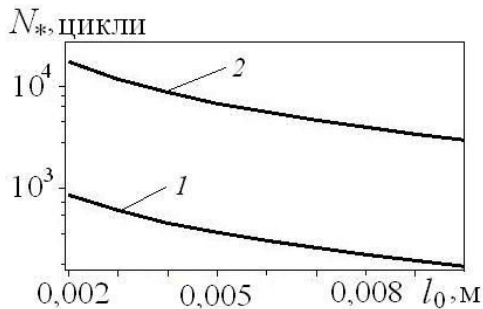


Рисунок 3. Залежність $N_* \sim l_0$ для пластини зі сталі 321: 1 – з урахуванням дії водню; 2 – без урахування дії водню

Figure 3. Dependence $N_* \sim l_0$ for a plate from steel 321: 1 – taking into account the action of hydrogen; 2 – without the account of action of hydrogen

$C_0 = 0,9$ ppm. У результаті цього отримаємо залежності для визначення довговічності пластини від довжини тріщини з урахуванням і без урахування дії водню, відповідно

$$N_*(C_H) = \int_{l_0}^{l_*} 285(1-12,56l) \cdot (1,256l + 3,985l^{0,85})^{-2} dl, \quad (28)$$

$$N_* = \int_{l_0}^{l_*} 285(1-12,56l) \cdot (1,256l + 0,6358l^{0,85})^{-2} dl. \quad (29)$$

На основі співвідношень (28), (29) побудована залежність N_* від початкового розміру дефекту l_0 (рис. 3) для випадків урахування (крива 1) і без урахування (крива 2) дії на пластину водневмісного середовища. Як бачимо, дія водневмісного середовища знижує довговічність елемента, що вказує про негативний вплив водню на повзучість матеріалу, тобто збільшує швидкість поширення повзучо-втомної тріщини.

Висновки. На основі енергетичного підходу запропоновано розрахункову модель для дослідження росту в конструкційних матеріалах повзучо-втомних тріщин за циклічних навантажень, високих температур і водневмісного середовища. За допомогою цієї моделі вдалося на прикладі аналогу задача Гріффітса показати значний вплив водню на поширення тріщини. Встановлено, що водень підвищує швидкість поширення повзучо-втомної тріщини, а це призводить до зниження залишкової довговічності пластини (може бути на порядок).

Conclusions. Based on the energy approach calculation model for research a creep-fatigue crack growth in the construction materials under cyclic loads, high temperature and environment containing hydrogen has been proposed. Using this model on the example of the Griffiths analogue problem a significant influence of hydrogen on crack propagation was shown. It was found, that hydrogen increases the rate of creep-fatigue crack and this leads to the decrease of the residual life-time of the plate (the decrease can be in order).

Список використаної літератури

1. Локощенко, А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов в агрессивных средах (Обзор) [Текст] / А.М. Локощенко // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2001. – № 4. – С. 27 – 41.
2. Murakami, Yu. Effect of hydrogen on fatigue crack growth in metals / Yu. Murakami // Proc. 17th Eur. Conf. on Fracture, ECF-17: “Multilevel Approach to Fracture of Materials, Components and Structures”, Brno, Czech Republic, 2008. – ESIS Czech Chapter, 2008. – CD ROM. - ISBN: 978-80-214-3692-3 – CE170081. – P. 25 – 42.
3. 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. // Proc. 17th Eur. Conf. on Fracture, ECF-17: “Multilevel Approach to Fracture of Materials, Components and Structures”, Brno, Czech Republic, 2008. – ESIS Czech Chapter, 2008. – CD ROM. - ISBN: 978-80-214-3692-3 – CE170082. – P. 2300 – 2307.
4. Андрейків, О.Є. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах [Текст] / О.Є. Андрейків, О.В. Гембара. – К.: Наук. думка, 2007. – 345 с.
5. Андрейків, О.Є. Міцність і руйнування металевих матеріалів і елементів конструкцій у водневмісних середовищах [Текст] / О.Є. Андрейків, Г.М. Никифорчин, В.І. Ткачов // Фізико-механічний інститут: поступ і здобутки; за ред. В.В. Панасюка, НАН України; Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. – Львів, 2001. – С. 248 – 286.
6. Андрейків, О.Є. Довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах [Текст] / О.Є. Андрейків // Прогресивні матеріали і технології. – К.: НАН України, 2003. – 2. – С. 423 – 439.
7. 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.
8. Андрейків, О.Є. Оцінка періодів зародження і поширення повзучо-втомних тріщин в тонкостінних елементах конструкцій [Текст] / О.Є. Андрейків, І.Я. Долінська, Н.В. Яворська // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2011. – № 3. – С. 7 – 15.
9. Шата, М. Енергетичний підхід у механіці втомного поширення макротріщини [Текст] / М. Шата, З.О. Терлецька // Механіка руйнування і міцність конструкцій; за ред. В.В. Панасюка. – Львів: Каменяр, 1999. – Вип. 2. – С. 141 – 148.
10. Garofalo, F. Fundamentals of creep and creep-rupture in metals / F. Garofalo. – New-York; London: Mac Millan Company, 1970. – 343 p.
11. Creep, fatigue and creep-fatigue crack growth rates in parent and simulated HAZ type 321 stainless steel / D.N. Gladwin, D.A. Miller, G.J. Neate, R.H. Priest // Fatigue and Fract. Eng. Mater. and Struct. – 1988. – 11, № 5. – P. 35.
12. Бабій, Л. Властивості корпусної сталі 15Х2МФА за умов повзучості у газоподібному водні [Текст] / Л. Бабій, О. Студент, А. Загорський // Фіз. хім. механіка матеріалів. – 2008. – Спецвипуск. – Т. 1. № 7. – С. 100–105.
13. 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. механ. матеріалів. – 2008. – № 5. – С. 98 – 104.
14. Панасюк, В.В. Основы механики разрушения [Текст] / В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, В.З. Партон. – К.: Наук. думка, 1988. – 488 с.
15. Андрейків, О.Є. Докритичний ріст плоскої тріщини в тривимірному тілі за високотемпературної повзучості [Текст] / О.Є. Андрейків, Н.Б. Сас // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2008. – № 2. – С. 19 – 26.
16. Хромченко, Ф.А. Ресурс сварных соединений парaproводов [Текст] / Ф.А. Хромченко. – М.: Машиностроение, 2002. – 352 с.

Отримано 16.09.2013