

П.Попович. Розрахункова модель для визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій за дії тривалого статичного навантаження і корозійного середовища / П.Попович, Л.Добровольська // Вісник ТНТУ. — 2014. — Том 73. — № 1. — С.179-186. — (машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).

УДК 620.191.33:620.193

П. Попович, канд. техн. наук; Л. Добровольська, канд. техн. наук

¹Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

²Луцький національний технічний університет

РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ДІЇ ТРИВАЛОГО СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ І КОРОЗІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА

Резюме. Сформульовано розрахункову модель для дослідження процесів руйнування тонкостінних елементів металоконструкцій з тріщинами за сумісної дії довготривалих статичних навантажень і корозійно-агресивних середовищ. В основу моделі покладено енергетичний підхід, а також основні положення механіки руйнування. На основі цього, а також відомих в літературі результатів математичного опису електрохімічних реакцій і окремих положень механіки руйнування отримано рівняння для опису кінетики поширення корозійно-механічних тріщин. Вказане рівняння разом з початковими і кінцевими умовами і складає запропоновану математичну модель визначення періоду докритичного росту корозійно-механічних тріщин у металевих матеріалах. Коректність отриманих аналітичних результатів підтверджена відовими в літературних джерелах експериментальними даними.

Ключові слова: корозійно агресивне середовище, концентрація водню, коефіцієнт інтенсивності напружень, тонкостінні елементи конструкцій, період докритичного росту корозійно-механічних тріщин.

P. Popovych, L.Dobrovolska

DESIGN MODEL FOR DETERMINATION OF RESIDUAL OPERATING-LIFE OF THIN-WALLED STRUCTURAL ELEMENTS UNDER DURABLE STATIC LOADING AND CORROSIVE ENVIRONMENT

Summary. The need to create a design model for metallic materials slow fracture under mutual mechanical loadings and corrosive aggressive environments basing on the power approach taking advantage of the first law of thermodynamics, has been interpreted. The design model, which describes the processes of the cracked metal construction thin-walled elements fracture under mutual durable static loadings and corrosive aggressive environment, has been stated. Power approach and fracture mechanics fundamentals are the basis of the model. Mathematical dependences for finding the residual operating-life rectilinear cracked plate which is subject to the symmetric durable static loadings relatively the crack location line and corrosive aggressive environments, have been proposed. Analytical dependences of the corrosive mechanical cracks propagation kinetics in a large plate comparing with the size of the crack have been proposed. Basing on the obtained solutions the residual operating-life of the steel plate with macroscopic crack under durable stretching and distilled water in the static problem statement has been calculated. Basing on the analytical dependences interpreted in the article and available results of mathematical electrochemical reactions and some principles of fracture mechanics the equation for description of the corrosion - mechanical cracks propagation kinetics, has been obtained. This equation together with the initial and finite conditions proved in the article make a mathematical model for determination of the period of the pre-critical growth of corrosion-mechanical cracks in metallic materials. The kinetic diagrams of cracks growth rate for the case of alloy steel specimens have been described. Basing on the researches of the proposed analytical dependences and calculation schemes it has been shown that with the increase of the crack initial size the residual durability of the plate decreases sharply. The correctness of the obtained analytical results is testified by the available experimental data.

Key words: metallic materials, corrosive aggressive environments, hydrogen concentration, stress intensity factor, thin-walled elements, kinetic diagrams of cracks growth rate.

Вступ. З [1–5], корозійне середовище посилює руйнування металевих матеріалів за довготривалого статичного навантаження і викликає поширення корозійно-механічних тріщин. Для визначення ресурсу (залишкового ресурсу) металевих елементів конструкцій за довготривалого статичного навантаження і дії корозійних середовищ необхідно мати відповідні розрахункові моделі. Більшість із відомих [1–10] розрахункових моделей побудовані на основі опису винятково локальних експериментальних даних. На основі даних теорій можна визначати ресурс (залишковий ресурс) окремих елементів конструкцій винятково з матеріалів, на експериментальних дослідженнях яких вони побудовані. В роботі [11] запропоновано розрахункову модель, побудовану з допомогою деформаційного підходу і певних припущень стосовно корозійних процесів у вершині тріщини, що також обмежує діапазон її коректного застосування.

Метою досліджень є створення розрахункової моделі сповільненого руйнування металевих матеріалів в умовах сумісної дії механічних навантажень і корозійно-агресивних середовищ з позиції енергетичного підходу на основі першого закону термодинаміки.

Результати досліджень. Розглянемо випадок, коли металева пластина з тріщиною (рис.1) розтягується довготривалими зовнішніми зусиллями з параметром p . Вважається, що така пластина міститься в корозійно-активному середовищі з певним відповідно водневим показником середовища і гальвано-потенціалом pH_n, φ_n , яке попадає в середину тріщини і створює біля її вершини уже свої параметри pH_B, φ_B , а механічна ситуація характеризується коефіцієнтом інтенсивності напружень K_{max} [4] (рис.1). Розвиток тріщини під напруженням у корозійно-активному середовищі відбувається в умовах періодичної появи біля її вершини свіжоутвореної поверхні (СУП), вільної від пасивувального шару й активованої напруженнями [10]. Виникнення цієї поверхні є початком функціонування гальванопари СУП (анод) – поверхня стінок тріщини (катод), вкрита пасивувальним шаром. При цьому вважається, що переважаючим катодним процесом в околі СУП є воднева деполяризація, параметри якої повністю визначаються відомими [6, 7, 10, 11] експериментальними даними. Остання зумовлює на поверхні вершини тріщини концентрацію водню $C_0(t)$, яку наближено можна визначити як і в роботах [12, 13].

Розглянемо конкретну задачу, коли пластина з прямолінійною наскрізною тріщиною довжини $2l_0$ (див. рис.2) знаходиться під дією симетричних відносно лінії розміщення тріщини довготривалих статичних навантажень F і корозійно-агресивного середовища, які викликають поширення корозійно-механічної тріщини. Задача полягає у визначенні залишкової довговічності такої пластини, тобто часу $t = t_*$, коли в результаті механічних навантажень і корозійно-агресивного середовища корозійно-механічна тріщина підросте до критичного розміру l_* і пластина зруйнується. Для розв'язання цієї задачі використаємо запропонований в роботах [14, 15] енергетичний підхід, в основу якого покладено перший закон термодинаміки для випадку елементарного просування тріщини на величину Δl_c за час Δt

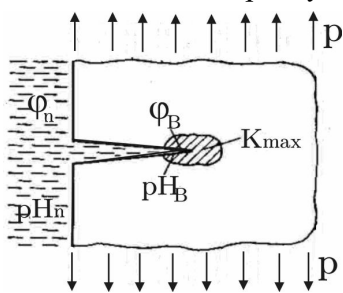


Рисунок 1. Схема навантаження тіла з тріщиною і дією корозійного середовища

Figure 1. Scheme of cracked body loading and under corrosive environment

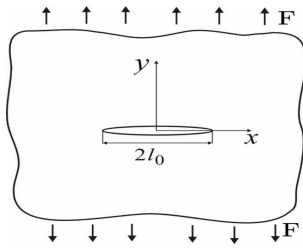


Рисунок 2. Схема навантаження пластини з тріщиною

Figure 2. Scheme of cracked plate loading

де W_s – пружна складова W ; $W_p^{(l)}(l)$ – частина роботи пластичних деформацій, які викликані рівномірно розподіленими зусиллями F і залежать тільки від довжини тріщини l ; Γ – енергія руйнування тіла, яка залежить від довжини тріщини l , характеристик середовища і часу t ; Q – величина виділеної теплової енергії при руйнуванні тіла, яку вважають відносно малою величиною і нею будемо нехтувати при обчисленнях; K – кінетична енергія, яка в даному випадку буде також малою величиною. Так як виконується умова балансу енергії (1), то звідси випливає, що буде виконуватися умова балансу швидкостей зміни складових енергій

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

$$W = W_s + W_p^{(l)}(l), \quad (2)$$

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

Підставляючи вираз (2) в (3), цю умову можемо записати у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial l} [\Gamma - (A - W_s - W_p^{(l)})] \frac{dl}{dt} + \frac{\partial \Gamma}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

Із рівняння (4) знайдемо величину швидкості поширення тріщини $V = dl/dt$

$$V = \frac{dl}{dt} = - \frac{\partial \Gamma}{\partial t} / \frac{\partial}{\partial l} [\Gamma - (A - W_s - W_p^{(l)})]. \quad (5)$$

На основі результатів робіт [15, 16] вираз у квадратних дужках у правій частині рівняння (5) запишемо

$$\frac{\partial}{\partial l} [\Gamma - (A - W_s - W_p^{(l)})] = \gamma_c - \gamma_t, \quad (6)$$

де $\gamma_t = \delta_t \sigma_0$ – питома робота пластичних деформацій в зоні передруйнування біля вершини тріщини; $\gamma_c = \delta_{cc} \sigma_0$ – її критичне значення.

Невідому величину Γ у рівнянні (5) будемо визначати аналогічно до результатів праць [10, 14, 15]

$$\Gamma = \Delta l_c \sigma_0 \delta_{cc}. \quad (7)$$

Тут δ_t – розкриття у вершині тріщини за навантаження F ; δ_{cc} – його критичне значення за корозійного руйнування; σ_0 – усереднене значення напружень у зоні передруйнування.

На основі результатів робіт [7, 10] довжину елементарного стрибка Δl_c тріщини представимо як суму елементарного поширення тріщини l_a за рахунок анодного розчинення й механічного стрибка l_m внаслідок механічного навантаження і наводнення при електрохімічній корозії, тобто

$$\Delta l_c = l_a + l_m. \quad (8)$$

Використовуючи результати робіт [10, 13], величини Δl_c , l_a , δ_{CC} , що входять до формул (8) і (9), можна визначити так:

$$l_m = \beta(\delta_t - \xi), l_a = Fm^{-1}n^{-1} \int_0^{\Delta t} i(t)dt, \delta_{CC} = \delta_C - AC_H(\Delta t) \quad (9)$$

Тут F – число Фарадея; m – грам-еквівалентна вага металу; n – валентність металу; ξ, β, A – константи, які визначаються із експерименту [10].

Розглянемо поширення корозійно-механічної тріщини за малого впливу анодного процесу. Вважаємо, що корозійно-механічна тріщина поширюється з відносно великою швидкістю, коли малий вплив анодного процесу, а основну роль відіграє механічна складова стрибка тріщини, тобто $l_m \gg l_a$. Тоді, підставляючи (6) – (9) в (5) і вважаючи, що $l_m \gg l_a$ з урахуванням відомих результатів праць [10, 14, 15], отримаємо рівняння для визначення періоду докритичного росту тріщини $t = t_*$ в пластині при дії довготривалих зусиль F і корозійного середовища

$$\frac{dl}{dt} = - \frac{[\partial(\delta_{CC}l_m)/\partial t]_{t=\Delta t}}{\delta_{CC} - \delta_t}. \quad (10)$$

Для повноти математичної моделі до рівняння (10) додамо відповідно такі початкову і кінцеву умови:

$$t = 0, l(0) = l_0; \quad (11)$$

$$t = t_*, l(t_*) = l_*; \quad (12)$$

$$\gamma_t(t_*) = \gamma_C. \quad (13)$$

На основі (8), (9) співвідношення (7) можна записати так:

$$\Gamma(t) = \sigma_0 \beta (\delta_t - \xi) [\delta_C - AC_H(t)]. \quad (14)$$

Використовуючи результати роботи [10], зміну концентрації водню $C_H(t)$ з часом Δt у зоні передруйнування для відносно нетривалого час можна представити таким чином:

$$C_H(\Delta t) \approx B \sqrt[4]{\Delta t i_{\max}}. \quad (15)$$

Тоді, враховуючи співвідношення (14), (15), похідну, яка входить до рівняння (10), можемо записати так:

$$\partial(\delta_{CC} \Delta l_c) / \partial t \approx -\eta(\delta_t - \xi). \quad (16)$$

Тут $\eta = 0,25 \beta A B \sqrt[4]{(\Delta t)^{-3} i_{\max}}$. Час Δt підготовки елементарного стрибка тріщини довжиною Δl_c можна наближено записати через швидкість її поширення V таким чином:

$$\Delta t \approx V^{-1} \Delta l_c. \quad (17)$$

Вважаючи, що $\delta_C \gg AC_H(t)$ і позначаючи $\xi = \delta_{scc}$, на основі (8), (9), (16) і (17) рівняння (10) запишемо

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\eta_1(\delta_t - \delta_{scc})}{(\delta_C - \delta_t)^4}, \eta_1 = 4 \cdot 10^{-3} \cdot i_{\max} (\beta AB)^4. \quad (18)$$

Як випливає з рівняння (18), при $\delta_t = \delta_{scc}$ швидкість корозійно-механічної тріщини дорівнює нулю, а при $\delta_t < \delta_{scc}$ – від’ємна. Це означає, що при $\delta_t < \delta_{scc}$ тріщина не буде поширюватися, тобто δ_{scc} є нижнє порогове значення на кінетичній діаграмі поширення корозійно-механічної тріщини [2].

Розглянемо випадок макроскопічної тріщини, коли справедливі співвідношення [16]

$$\frac{\delta_t(l)}{\delta_{CC}} = \frac{K_I^2(l)}{K_{IC}^2}, \quad \delta_{scc} = \frac{K_{scc}^2}{\sigma_0 E}, \quad \delta_t(l) = \frac{K_I^2(l)}{\sigma_0 E}. \quad (19)$$

Підставляючи (19) в (18), отримаємо

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\eta_2 [K_I^2(l) - K_{scc}^2]}{[K_{IC}^2 - K_I^2(l)]^4}, \eta_2 = 4 \cdot 10^{-3} \cdot (E\sigma_0)^3 i_{\max} (\beta AB)^4. \quad (20)$$

Тут K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень; K_{IC} , K_{scc} – його відповідно верхнє і нижнє порогові значення на кінетичній діаграмі поширення корозійно-механічної тріщини. Для повноти математичної моделі до рівняння (20) додамо на основі (11)–(13) і (19) такі початкову і кінцеву умови:

$$\begin{aligned} t = 0, \quad l(0) = l_0; \\ t = t_*, \quad l(t_*) = l_*; \quad K_I(l_*) = K_{IC}. \end{aligned} \quad (21)$$

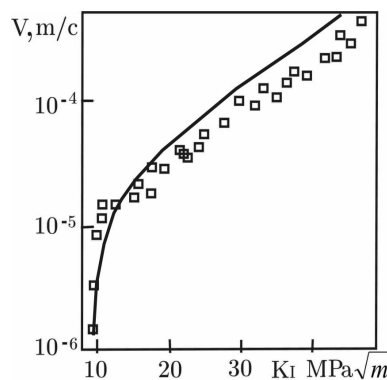


Рисунок 3. Порівняння експериментальних і розрахункових даних для сталі 45XN2MFA

Figure 3. Comparison of experimental and calculation data for steel 45XN2MFA

Таким чином, якщо емпірично знайдено характеристики K_{IC} , K_{scc} , η_2 і побудовано формули для визначення K_I , то розв’язок поставленої задачі дається співвідношеннями (20), (21).

Справедливість отриманого виразу (20) перевіряли на дослідних даних [17] для сталі 45XN2MFA (випробування в дистильованій воді). Як бачимо із рис.3, експериментальні дані (квадратики) незначно відхиляються від суцільної лінії (співвідношення (20)), що підтверджує коректність запропонованої розрахункової моделі (20), (21).

Розглянемо випадок, коли є велика активність анодних процесів, тобто має місце залежність $l_a \geq l_m$. Тоді поширення корозійно-механічної тріщини буде в основному проходити приблизно з однаковою швидкістю, а кінетична діаграма швидкості росту тріщини (ШРТ) буде мати плато [1, 2, 5]. Як приклад, на рис.4 представлена кінетична діаграма ШРТ сталі 45XN2MFA у водному розчині CrO_4^{2-} [17]. Наявність такої конфігурації діаграми ШРТ пояснюється тим [2], що в результаті тривалого часу Δt інкубаційного періоду

підготовки елементарного стрибка тріщини проходить з ростом K_I затушення її вершини. Це, в свою чергу, призводить до зменшення концентрації напружень і, відповідно, стабілізації швидкості V . При таких кінетичних діаграмах ШРТ можна вважати, що корозійно-механічна тріщина весь час рухається наближено з однаковою швидкістю V_c і залишкова довговічність $t = t_*$ тонкостінного елемента конструкції буде визначатися (з похибкою в запас довговічності) за формулою

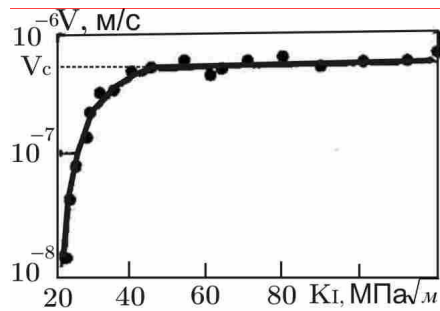


Рисунок 4. Кінетична діаграма швидкості росту тріщин сталі 45ХН2МФА в водному розчині CrO_4^{-2}

Figure 4. Kinetic diagrams of cracks growth rate of 45KHN2MFA in water solution CrO_4^{-2}

$$t_* = V_c(t_* - t_0). \quad (22)$$

Кінетика поширення корозійно-механічної тріщини у великій (порівняно з розмірами тріщини) пластині. Розглянемо квадратну пластину зі стороною a , з початковою тріщиною довжини l_0 , яка піддана дії корозійного середовища і розтягується постійними рівномірно розподіленими довготривалими статичними зусиллями інтенсивності F , які направлені перпендикулярно до лінії розміщення тріщини (див. рис. 2). Задача полягає у визначенні часу $t = t_$, після досягнення якого тріщина підросте до критичного розміру $l = l_*$ і пластина зруйнується.*

Для спрощення розв'язку задачі будемо вважати, що розміри пластини набагато більші від розміру тріщини, тобто $a \gg l$. У даному випадку це буде аналог задачі Гріффітса для випадку поширення корозійно-механічної тріщини в пластині і тому коефіцієнт інтенсивності напружень K_I буде визначатися за формулою

$$K_I = F\sqrt{\pi l}. \quad (23)$$

Підставляючи (23) в рівняння (20), для визначення в даному випадку періоду $t = t_*$ докритичного росту тріщини отримаємо таку математичну модель:

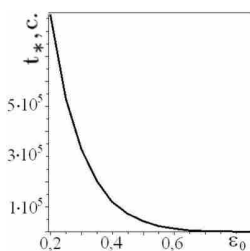


Рисунок 5. Залежність залишкової довговічності t_* від початкової довжини тріщини ϵ_0

Figure 5. Dependence of residual durability t_* on initial length of crack ϵ_0

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\eta_2[\pi l F^2 - K_{scc}^2]}{[K_{IC}^2 - \pi l F^2]^4}, \quad (24)$$

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad (25)$$

$$t = t_*, \quad l(t_*) = l_*; \quad K_I(l_*) = K_{IC}. \quad (26)$$

Інтегруючи (24) за умов (25), (26), отримаємо

$$t_* = \eta_2^{-1} \int_{l_0}^{l_*} \frac{[K_{IC}^2 - \pi l F^2]^4}{\pi l F^2 - K_{scc}^2} dl, \quad (27)$$

де величина l_* визначається із (23) і останньої формули (26) таким чином:

$$l_* = K_{IC}^2 \pi^{-1} F^{-2}. \quad (28)$$

Вважаємо, що пластина виготовлена зі сталі 45ХН2МФА, для якої [17]

$$K_{sc} = 9 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}, \eta_2 = 1,1 \cdot 10^6 (\text{МПа})^2 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}, F = 120 \text{ МПа}, K_{IC} = 50 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}, l_* = 0,055 \text{ м}.$$

Використовуючи ці дані, співвідношення (27) запишемо так:

$$t_* = 35310^4 \int_{\varepsilon_0}^1 \frac{[1-\varepsilon]^4}{\varepsilon - 33 \cdot 10^{-3}} d\varepsilon, \varepsilon = l_0 l_*^{-1}. \quad (29)$$

На основі формули (29) на рис.5 побудована графічна залежність залишкового ресурсу пластини $t = t_*$ від безрозмірного значення початкового розміру тріщини ε_0 . Як бачимо із рис.5, збільшення початкового розміру тріщини різко зменшує залишкову довговічність пластини.

Висновки. Запропоновано розрахункову модель, яка описує процеси руйнування тонкостінних елементів металоконструкцій з тріщинами при спільній дії довготривалих статичних навантажень і корозійно-агресивних середовищ. В основу моделі покладено енергетичний підхід. Запропоновано математичні залежності для визначення залишкового ресурсу пластини з прямолінійною наскрізною тріщиною, що знаходиться під дією симетричних відносно лінії розміщення тріщини довготривалих статичних навантажень, а також корозійно-агресивного середовища. Показано, що зі збільшенням початкового розміру тріщини залишкова довговічність пластини різко зменшується.

Conclusions. Design model, which describes the processes of the thin-walled elements fracture in cracked metallic materials under combined action of durable static loadings and corrosive aggressive environment, has been proposed. Power approach is the basis of the model. Mathematic dependences for determination of the residual operating- life of the plate with the rectilinear crack under durable static loadings relatively the crack location line and corrosive aggressive environment have been proposed. It has been shown that with the increase of the crack initial size the residual durability of the plate decreases sharply.

Список використаної літератури

1. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов [Текст] / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин и др. – Киев: Наукова думка, 1990.– 660 с.
2. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения/ Г. П. Черепанов.– М.: Наука, 1974.–640 с.
3. Arnoux, P. Atomistic simulations of stress corrosion cracking/ P. Arnoux // Corrosion Science. – 2010. – 52. – P. 1247–1257.
4. Дмитрах, І.М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень [Текст] /І.М. Дмитрах , В.В. Панасюк . – Львів: ФІМІ НАНУ, 1999. – 340 с.
5. Sieradzki K. Stress-corrosion cracking/К. Sieradzki, R.C. Newman // J. Phys. Chem. Solids. – 1987. – 48, No. 11. – P. 101 – 1113.
6. Andreikiv, O. E. Electrochemical model of local corrosion at the tip of a loaded crack / O. E. Andreikiv , N. I. Tym'yak // Materials Science. – 1994. – 30, № 1.– P. 19 – 24
7. Tym'yak, N. I. Evaluation of crack-growth rate under conditions of simultaneous action of static loading and corrosive media / N. I. Tym'yak , O. E. Andreikiv // Materials Science. – 1995. – 31, № 2.– P. 219 – 225.
8. Young, G.A. The mechanism and modelling of intergranular stress corrosion cracking of nickel–chromium–iron alloys exposed to high purity water, in: Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems /G.A. Young, W.W. Wilkening , D.S. Morton, E Richey, N. Lewis // Water Reactors. – 2005.
9. Андрейків, О.Є. Довговічність металічних матеріалів у водневмісних середовищах [Текст] // Прогресивні матеріали і технології / О.Є. Андрейків за ред.. І.К. Походні. – К.: Наукова думка. – 2003. – С. 241 – 257.

10. Андрейків, О.Є. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах [Текст] / О.Є. Андрейків, О.В. Гембара. – Київ: Наукова думка, 2008. – 344 с.
11. Сакара, А. Математичне моделювання процесів руйнування металевих матеріалів за механічного навантаження та дії водневих і корозійних середовищ // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів [Текст] / А. Сакара, Ю. Банахевич, І. Лохман. Спецвипуск журналу «Фізико-хімічна механіка матеріалів». – № 8, Т.1, – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. – 2010. – С. 120 – 124.
12. Hembara, O.V. Hydrogen concentration near the tip of a corrosion crack / O.V. Hembara, Z.O. Terlets'ka, O.Ya. Shepil' // Materials Science. – 2008. – 44, № 1. – P. 133 – 137.
13. Hembara, O.V., Determination of electric fields in electrolyte-metal systems / O.V. Hembara, Z.O. Terlets'ka, O.Ya. Shepil' // Materials Science. – 2007. – 43, № 2. – P. 222 – 229.
14. Andreikiv, O.Ye. Fracture mechanics of metal plates under high-temperature creep /O.Ye. Andreikiv, N.B. Sas // Mater. Sci. – 2006. – 42, No. 2. – P. 210 – 219.
15. Andreikiv, O.E. Strength of thin-walled structural elements with cracks under the conditions of creep /O.Ye. Andreikiv, N.B. Sas // Mater. Sci. – 2007. – 43, No. 2. – P. 174 – 182.
16. Панасюк, В.В Основы механики разрушения [Текст] / В.В. Панасюк, О.Є. Андрейків, В.З. Паргон.– К.: Наукова думка, 1988. – 488 с.
17. Romaniv, O.N. Inhibitor protection of high-strength steels from corrosion cracking in the stage of crack propagation / O.N. Romaniv, G.N. Nikiforchin, A.T. Tsirul'nik // Materials Science. – 1981. – 17, № 1. – P. 42 – 49.

Отримано 24.02.2014