

УДК: 539.375:620.191.33:620.193

РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ПОШИРЕННЯ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНОЇ ТРІЩИНИ ЗА ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

О. Є. АНДРЕЙКІВ¹, І. Я. ДОЛІНСЬКА², А. Р. ЛИСИК¹, Н. Б. САС³

¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

³ Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького

Сформульовано математичну модель для дослідження руйнування тонкостінних елементів конструкцій з тріщинами під дією довготривалих статичних навантажень і корозивно-агресивних середовищ. В її основі – енергетичний підхід, а також ідеї механіки руйнування. Отримано рівняння для вивчення кінетики росту корозійно-механічних тріщин, яке разом з початковою і кінцевою умовами утворює математичну модель для визначення періоду їх докритичного росту у металевих матеріалах. Визначено вплив корозивно-кислого середовища на довговічність тонкостінної пластини з тріщиною зі сталі 20 (аналог задачі Гріффітса) за дії статичних навантажень і високотемпературної повзучості. Побудовано залежність довговічності пластини від початкового розміру дефекту у корозивному середовищі і повітрі. Виявлено, що корозивне середовище збільшує швидкість поширення тріщини повзучості, що призводить до зменшення довговічності елементів конструкцій.

Ключові слова: перший закон термодинаміки, високотемпературна повзучість, концентрація водню, коефіцієнт інтенсивності напружень, тонкостінні елементи конструкцій, зона передруйнування, кінетика росту корозійно-механічних тріщин.

Як відомо [1–5], корозивне середовище посилює руйнування металевих матеріалів за довготривалого статичного навантаження і викликає поширення корозійно-механічних тріщин. Для розрахунку залишкового ресурсу металевих елементів конструкцій за цих умов необхідно мати відповідні моделі. Більшість із відомих [1–5] ґрунтуються тільки на конкретних експериментальних результатах. Використовуючи їх, можна визначити залишковий ресурс лише деяких елементів конструкцій. Недостатньо досліджено вплив корозивного середовища на ріст тріщин високотемпературної повзучості, що є часто основним механізмом втрати довговічності елементів конструкцій енергетики, літальних апаратів, хімічного, нафтовидобувного, транспортного обладнання тощо.

Нижче за відомим [6, 7] енергетичним підходом зроблено спробу побудувати розрахункову модель для визначення періоду докритичного росту тріщин високотемпературної повзучості в металевих матеріалах за дії довготривалих статичних навантажень і корозивних середовищ. Суть її ось у чому.

Формулювання моделі. Нехай пластина з прямолінійною тріщиною початкової довжини l_0 піддана дії корозивного кислого середовища, високої температури T_0 (т.зв. температура високотемпературної повзучості [8]) і довготривалих статичних навантажень, які описує силовий параметр p (рис. 1). Вважаємо, що тріщина макроскопічна, а зовнішні навантаження розтягу прикладені так, що відносно лінії розміщення тріщини напружено-деформований стан симетричний,

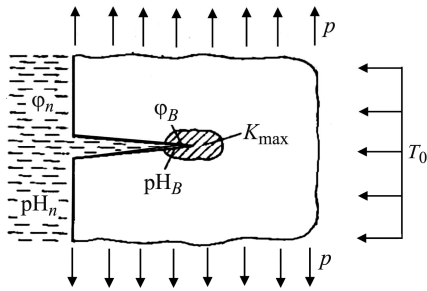


Рис. 1. Схема навантаження пластини з корозійною тріщиною.

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

тобто в околі її вершини його описує тільки коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) K_I . Водночас приймаємо, що така пластинка міститься в корозивно-активному середовищі з водневим показником pH_n і гальванічним потенціалом ϕ_n , яке після попадання в середину тріщини біля її вершини матиме параметри pH_B , ϕ_B , а механічну ситуацію характеризуватиме КІН K_{max} [4] (рис. 1). Задача полягає у визначенні часу $t = t_*$, коли в результаті високотемпературної повзучості і дії корозивного середовища тріщина підросте до критичного розміру $l = l_*$ і пластинка зруйнується.

Для розв'язку задачі насамперед побудуємо математичну модель, тобто рівняння, які описують цей процес. Вважаємо, що тріщина рухається неперервно від початкового розміру $l = l_0$ до кінцевого $l = l_*$. Це припущення є коректним, так як реальний її рух супроводжується стрибками малого розміру Δl_c за відносно тривалий час Δt_C . Також припускаємо, що просування тріщини стимулюватимуть два механізми: високотемпературна повзучість і корозійна деградація зони передруйнування біля її вершини, яка активізується за механізмом анодного розчинення і наводнювання внаслідок катодних процесів у кислих середовищах.

Енергетичний баланс для елементарного стрибка тріщини запишемо так [6, 7]:

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

Тут A – робота зовнішніх сил, яку вважаємо сталою; W – енергія деформування тіла, яку подамо у вигляді

$$W = W_{sp} + W_{pl}^{(1)}(l) - W_{pl}^{(2)}(t), \quad (2)$$

де W_{sp} – пружна складова W ; $W_{pl}^{(1)}(l)$ – частина енергії пластичного деформування, що залежить від довжини тріщини l ; $W_{pl}^{(2)}(t)$ – частина енергії пластичного деформування за сталої довжини тріщини під час інкубаційного періоду $t = \Delta t_C$ підготовки її стрибка, що залежить від часу t , концентрації водню C_0 і генерується самим тілом; Γ – енергія руйнування тіла, яка залежить від довжини тріщини і часу $t = \Delta t_C$; $Q = \text{const}$ – тепла енергія від зовнішніх джерел тепла; K – кінетична енергія, яка в цьому випадку несуттєва і її нехтуємо.

Оскільки виконується рівняння енергетичного балансу (1), то існуватиме баланс швидкостей зміни енергії, тобто

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

Підставляючи вираз (2) в (3) і вважаючи, що $\partial A / \partial t = 0$ (зовнішні зусилля прикладені далеко від тріщини і не змінюються з часом), отримаємо:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\Gamma - \left(A - W_{sp} - W_{pl}^{(1)} \right) \right] \frac{dl}{dt} - \left[\frac{\partial (W_{pl}^{(2)} - \Gamma)}{\partial t} \right]_{t=t_c} = 0. \quad (4)$$

Звідси знайдемо швидкість поширення тріщини повзучості:

$$V = \frac{dl}{dt} = \left[\frac{\partial(W_{pl}^{(2)} - \Gamma)}{\partial t} \right]_{t=t_c} / \frac{\partial}{\partial l} \left[\Gamma - (A - W_{sp} - W_{pl}^{(1)}) \right]. \quad (5)$$

Вираз у квадратних дужках запишемо так [6, 7]:

$$\frac{\partial}{\partial l} \left[\Gamma - (A - W_{sp} - W_{pl}^{(1)}) \right] = \gamma_f - \gamma_t. \quad (6)$$

Підставляючи співвідношення (6) у рівняння (5), одержимо:

$$V = \frac{dl}{dt} = \left[\frac{\partial(W_{pl}^{(2)} - \Gamma)}{\partial t} \right]_{t=t_c} / (\gamma_f - \gamma_t). \quad (7)$$

Для повноти математичної моделі до рівняння (7) додамо початкову і кінцеву умови

$$t = 0, \quad l(0) = l_0, \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*, \quad (8)$$

де критичну довжину тріщини l_* визначимо із енергетичного критерію

$$\gamma_t(l_*) = \gamma_f. \quad (9)$$

Тут $\gamma_t = \delta_t \sigma_t$ – питома робота пластичних деформацій у зоні передруйнування біля вершини тріщини; $\gamma_f = \delta_{CC} \sigma_t$ – її критичне значення; δ_t – розкриття у вершині тріщини; δ_{CC} – його критичне значення за корозійного руйнування; t_* – час докритичного росту макротріщини; σ_t – усереднені нормальні напруження в зоні передруйнування.

Оскільки зона передруйнування пластично деформуватиметься під великими напруженнями σ_t , можна припустити, що під час підготовки стрибка тріщини більшість часу займатиме усталена повзучість, коли $\dot{\epsilon}_t = \text{const}$ або $\dot{\delta}_t(x) = \text{const}$.

Тут $\dot{\epsilon}_t$ – швидкість зміни деформації в зоні передруйнування; $\dot{\delta}_t(x)$ – швидкість її розкриття [6, 7]. Для усталеної повзучості деформаційні характеристики зони передруйнування біля вершини тріщини визначимо так:

$$\epsilon(x, t, C_0) = \epsilon(x, 0) + \dot{\epsilon}(C_0)t, \quad \delta_t(x, t, C_0) = \delta_t(x, 0) + \dot{\delta}_t(C_0)t. \quad (10)$$

За довготривалого статичного навантаження, високої температури та дії корозивного середовища тріщина поширюватиметься [6, 7] стрибками, довжини яких

$$\Delta l_C \approx \alpha_0 \delta_t(0, 0, C_0), \quad (11)$$

де α_0 – константа, яку визначають із експерименту [6, 7]. Використовуючи відомі результати [9, 10], довжину елементарного стрибка Δl_C тріщини подамо так:

$$\Delta l_C = l_a + l_m, \quad (12)$$

де l_a – довжина елементарного стрибка через анодне розчинення, а l_m – механічного внаслідок навантаження і наводнювання за електрохімічної корозії.

Застосовуючи вираз (11) і результати праць [9, 11], визначимо:

$$l_m = \alpha_0 (\delta_t - \xi), \quad l_a = \alpha_0 F m^{-1} n^{-1} \int_0^{\Delta t} i(t) dt, \quad \delta_{CC} = \delta_C - A C_H (\Delta t). \quad (13)$$

Тут F – число Фарадея; m – грам-еквівалентна вага металу; n – його валентність; ξ , A – константи, які визначають із експерименту [9]; $i(t)$ – густина анодного

струму на поверхні вершини тріщини; δ_C – критичне розкриття тріщини δ_t без корозії.

На основі відомих результатів [7, 9], а також співвідношень (12) і (13) енергію руйнування тіла подамо так:

$$\Gamma(t) = \sigma_t \alpha_0 (\delta_t - \xi) [\delta_C - AC_H(t)]. \quad (14)$$

Тепер визначимо зміну концентрації водню $C_H(t)$ у зоні передруйнування для відносно невеликих часів Δt [10]:

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

де B – константа, яку знаходять із експерименту.

Як свідчать результати випроб (див., наприклад, [12]), за малих і середніх концентрацій водню $C_H(t)$ величину $\dot{\epsilon}_t(C_0)$, як і $\dot{\delta}_t(C_0)$, можна подати лінійною залежністю

$$\dot{\delta}_t(C_0) = \dot{\delta}_t(0) (1 + \alpha_1 B^4 \sqrt[4]{\Delta t C i_{\max}}), \quad (16)$$

де α_1 – константа, яку розраховують із експерименту.

Інкубаційний період $t = \Delta t_C$ підготовки елементарного стрибка тріщини високотемпературної повзучості визначатимемо так. Вважаємо, що тріщина почне поширюватися, коли максимальне розкриття в зоні передруйнування $\delta_t(x, t, C_0)$ досягне критичного значення δ_{CC} , тобто зі співвідношень (10), (13) і (16) отримаємо рівняння

$$\delta_C - \delta_t(x, 0) = \dot{\delta}_t(0) \Delta t_C [1 + \alpha_1 B^4 \sqrt[4]{\Delta t_C i_{\max}}] + AB^4 \sqrt[4]{\Delta t_C i_{\max}}, \quad (17)$$

розв'язуючи яке, щоб визначити Δt_C , і вважаючи $\alpha_1 B i_{\max}^{0,25} \ll 1$ і $AB i_{\max}^{0,25} \ll 1$, дістанемо:

$$\Delta t_C \approx \dot{\delta}_t^{-1}(0) (\delta_C - \delta_t(0)). \quad (18)$$

Так як величина Δl_C достатньо мала, то, очевидно, на такій малій віддалі від вершини тріщини розкриття $\delta_t(x, t, C_0)$ змінюється незначно і її наближено по x можна вважати константою, тобто $\delta_t(x, t, C_0) \approx \delta_t(0, t, C_0)$ ($0 \leq x \leq \Delta l_C$). Тоді на основі формул (10) і (14), а також відомих результатів [6, 7] складові рівняння (7) можна записати так:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Gamma(t)}{\partial t} \Big|_{t=\Delta t_C} &\approx -0,25 \alpha_0 \sigma_t AB^4 \sqrt[4]{(\Delta t_C)^{-3} i_{\max}} (\delta_t - \xi), \\ \frac{\partial W_{pl}^{(2)}(t, C_0)}{\partial t} \Big|_{t=\Delta t_C} &\approx 2 \alpha_0 \sigma_t \dot{\delta}_t(0) \left[\delta_t(0) + \dot{\delta}_t(0) \cdot \Delta t_C (1 + \alpha_1 B^4 \sqrt[4]{\Delta t_C i_{\max}}) \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Підставляючи співвідношення (10), (18) і (19) у рівняння (7), для визначення періоду $t = t_*$ докритичного росту тріщини високотемпературної повзучості з урахуванням дії корозивного середовища отримаємо кінетичне рівняння

$$\begin{aligned} \frac{dl}{dt} = \frac{2 \alpha_0 \delta_C \dot{\delta}_t(0)}{\delta_C - \delta_t(0)} + \frac{0,25 \alpha_0 AB \dot{\delta}_t^{0,75}(0) i_{\max}^{0,25} (\delta_t(0) - \xi)}{[\delta_C - \delta_t(0)]^{1,75}} + \\ + 2 \alpha_0 \alpha_1 B \dot{\delta}_t^{0,75}(0) \sqrt[4]{i_{\max}} (\delta_C - \delta_t(0)) \end{aligned} \quad (20)$$

з початковими і кінцевими умовами

$$t = 0, \quad l(0) = l_0, \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*, \quad \delta_t(l_*) = \delta_C. \quad (21)$$

Коли тріщина макроскопічна [6, 7] і вплив анодного розчинення від корозивного середовища незначний, математична модель (20), (21) набуде вигляду

$$\frac{dl}{dt} = \frac{2\alpha_0 \dot{\delta}_t(0)}{1 - K_I^2 K_{IC}^{-2}} + 2\alpha_0 \alpha_1 B(\sigma_t E)^{-0.25} \dot{\delta}_t^{0.75}(0) \sqrt[4]{i_{\max}(K_{IC}^2 - K_I^2)}, \quad (22)$$

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

У рівнянні (22) $\dot{\delta}_t(0)$ – швидкість розкриття вершини тріщини за високотемпературної повзучості зони передруйнування, яку, як і в праці [7], виразимо так:

$$2\alpha_0 \dot{\delta}_t(0) = A_{2t} (K_I K_{IC}^{-1})^{2m}. \quad (24)$$

Тут A_{2t} , m – характеристики високотемпературної повзучості матеріалу, які визначають із експерименту [7]. З урахуванням виразу (24) математичну задачу (22), (23) запишемо так:

$$\frac{dl}{dt} \approx \frac{A_{2t} (K_I K_{IC}^{-1})^{2m}}{1 - K_I^2 K_{IC}^{-2}} + B_1 (K_I K_{IC}^{-1})^{1.5m} \sqrt[4]{1 - K_{IC}^{-2} K_I^2}, \quad (25)$$

$$B_1 = (2\alpha_0)^{0.25} \alpha_1 B(\sigma_t E)^{-0.25} A_{2t}^{0.75} i_{\max}^{0.25} \sqrt{K_{IC}},$$

$$t = 0, \quad l(0) = l_0, \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*, \quad K_I(l_*) = K_{IC}. \quad (26)$$

Таким чином, якщо із експерименту знайдені характеристики B_1 , K_{IC} , m , A_{2t} , то період $t = t_*$ обчислюють за математичною моделлю (25), (26).

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

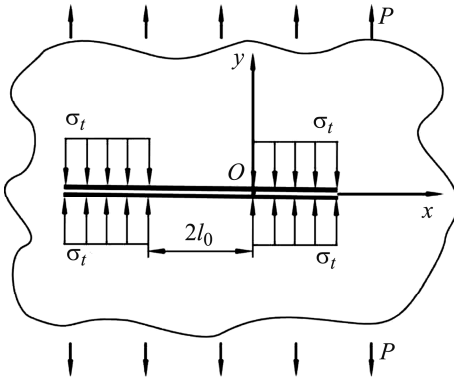


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Схема навантаження пластини з тріщиною в задачі Гріффітса.

Fig. 2. Loading mode of a plate with a crack in Griffit's problem.

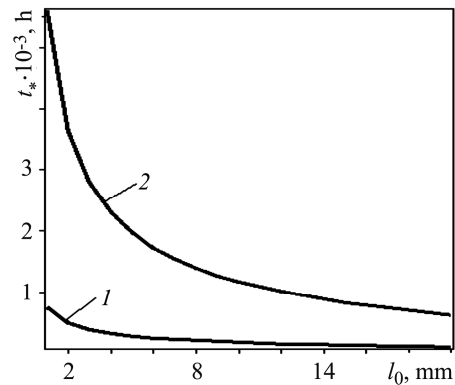


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Залежність періоду t_* від початкового розміру тріщини l_0 :

1 – у корозивному середовищі; 2 – у повітрі.

Fig. 3. Dependence of period t_* on initial crack size l_0 : 1 – in corrosive environment; 2 – in air.

Розв'язуємо задачу, інтегруючи рівняння (25) за умов (26) і приймаючи для задачі Гріффітса $K_I = p\sqrt{\pi l}$. У результаті для визначення періоду $t = t_*$ отримаємо формулу

$$t_* \approx \int_{l_0}^{l_*} \frac{(1 - K_I^2 K_{IC}^{-2}) dl}{A_{2t} (K_I K_{IC}^{-1})^{2m} + B_1 (K_I K_{IC}^{-1})^{1,5m} \sqrt[4]{1 - K_{IC}^{-2} K_I^2 (1 - K_I^2 K_{IC}^{-2})}}, \quad (27)$$

яку застосуємо для визначення залежності періоду $t = t_*$ (аналог задачі Гріффітса) від початкового розміру тріщини l_0 , коли пластина виготовлена зі сталі 20 [13]. Використовуючи діаграми поширення тріщини повзучості у корозивному середовищі і повітрі [13], приймемо такі характеристики матеріалу і параметри навантаження: $A_{2t} = 1,21 \cdot 10^{-3}$ м/г, $m = 1,54$, $K_{IC} = 100$ МПа $\sqrt{\text{м}}$, $B_1 = 8,37 \cdot 10^{-3}$ м/г, $p = 120$ МПа (рис. 3). Як бачимо, корозивне середовище зменшує період докритичного росту тріщин високотемпературної повзучості в пластинах (залишковий ресурс тонкостінних елементів конструкцій).

ВИСНОВКИ

Побудована математична модель для визначення залишкового ресурсу металевих елементів конструкцій з тріщинами за довготривалого статичного навантаження, високої температури та дії корозивних середовищ. Її застосування продемонстровано на задачі про довготривалий розтяг пластини з тріщиною за високої температури і дії водневовмісних середовищ. Встановили, що для пластини зі сталі 20 швидкість росту тріщини високотемпературної повзучості у корозивному середовищі більша, а залишкова довговічність менша, ніж у повітрі.

РЕЗЮМЕ. Сформулирована математическая модель для исследования разрушения тонкостенных элементов конструкций с трещинами под действием длительных статических нагрузок и коррозионно-агрессивных сред. В ее основе – энергетический подход, а также идеи механики разрушения. Получено уравнение для изучения кинетики роста коррозионно-механических трещин, которое вместе с начальными и конечными условиями образует математическую модель для определения периода их докритического роста в металлических материалах. Определено влияние коррозионно-кислой среды на долговечность тонкостенной пластины с трещиной из стали 20 (аналог задачи Гриффитса) при воздействии статических нагрузок и высокотемпературной ползучести. Построена зависимость долговечности пластины от начального размера дефекта в коррозионной среде и воздухе. Выявлено, что коррозионная среда повышает скорость распространения трещины ползучести, что приводит к уменьшению долговечности элементов конструкций.

SUMMARY. The mathematical model for investigation of the fracture processes of the thin-walled construction elements with cracks under the action of long-term static loadings and corrosive aggressive environments is formulated. The energy approach and also the main ideas of fracture mechanics are used as the model basis. Equation has been obtained for description of corrosive-mechanical crack growth kinetics. This equation together with the initial and final conditions forms a mathematical model for determination of the period of corrosive-mechanical crack subcritical growth in the metallic materials. On the basis of it the influence of corrosive environments on the life time of a thin-walled plate of steel 20 with a crack (analog of the Griffith problem) under static loads and high-temperature creep are determined. The dependence of the plate life time on the initial defect size in corrosive environment and in air is graphically constructed. It is shown that corrosive environment increases the rate of the creep crack propagation, which leads to a decrease in the construction elements life time.

1. *Механика* разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – Т. 4.: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин, Н. А. Махутов, М. М. Стадник. – К.: Наук. думка, 1990. – 660 с.

2. Черепанов Г. П. Механика разрушения. – М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2012. – 872 с.
3. Arnoux P. Atomistic simulations of stress corrosion cracking // *Corr. Sci.* – 2010. – **52**. – P. 1247–1257.
4. Дмитрах І. М., Панасюк В. В. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. – Львів: Фіз.-хім. мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 1999. – 340 с.
5. Sieradzki K. and Newman R. C. Stress-corrosion cracking // *J. Phys. Chem. Solids.* – 1987. – **48**, № 11. – P. 101–1113.
6. Андрейків О. Є., Добровольська Л. Н., Яворська Н. В. Поширення в металевих матеріалах тріщин високотемпературної повзучості за дії водню // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2014. – **50**, № 3. – С. 45–52.
(Andreikiv O. E., Dobvol's'ka L. N., and Yavors'ka N. V. Growth of high-temperature creep cracks in metallic materials under the influence of hydrogen // *Materials Science.* – 2014. – **50**, № 3. – P. 358–368.)
7. Андрейків О. Є., Сас Н. Б. Докритичний ріст плоскої тріщини в тривимірному тілі за високотемпературної повзучості // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 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.)
8. Garofalo F. *Fundamentals of creep and creep-rupture in metals.* – New York; London: Mac Millan Company, 1970. – 344 p.
9. Андрейків О. Є., Гембара О. В. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
10. Тим'як Н. І., Андрейків О. Є. Визначення швидкості росту тріщин в умовах сумісної дії статичних навантажень і корозійно-активного середовища // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 1995. – **31**, № 2. – С. 68–74.
(Тим'як Н. І. and Andreikiv O. E. Evaluation of crack-growth rate under conditions of simultaneous action of static loading and corrosive media // *Materials Science.* – 1995. – **31**, № 2. – P. 219–225.)
11. Гембара О. В., Терлецька З. О., Чепіль О. Я. Визначення електричних полів у системі електроліт–метал // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2007. – **43**, № 2. – С. 71–77.
(Hembara O. V., Terlets'ka Z. O., and Chepil' O. Ya. Determination of electric fields in electrolyte-metal systems // *Materials Science.* – 2007. – **43**, № 2. – P. 222–229.)
12. Бабій Л., Студент О., Загорський А. Властивості корпусної сталі 15Х2МФА за умов повзучості у газоподібному водні // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2008. – **1**, спецвип. № 7. – С. 100–105.
13. Шульженко М., Гонтаровський П., Мележик І. Оцінювання впливу агресивного середовища на кінетику тріщин в елементах енергообладнання // *Машинознавство.* – 2011. – № 3–4. – С. 45–49.

Одержано 21.06.2016