

УДК: 539.375;539.4

ВПЛИВ КОРОЗИВНО-НАВОДНЮВАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ НА ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ЇХ МАНЕВРОВОГО РЕЖИМУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О. Є. АНДРЕЙКІВ¹, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ², І. Я. ДОЛІНСЬКА², А. Р. ДЗЮБИК³

¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка;

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

³ Національний університет "Львівська політехніка"

Сформульовано енергетичний підхід для визначення кінетики росту тріщин за маневрового режиму експлуатації обладнання і впливу робочих середовищ. Побудовано розрахункові моделі для оцінювання впливу корозивного та водневмісного середовищ на період докритичного росту тріщини повзучості за маневрового режиму експлуатації.

Ключові слова: енергетичний підхід, маневровий режим експлуатації, корозивне середовище, водневмісне середовище, період докритичного росту тріщини.

Оцінювання довговічності (залишкової) елементів конструкцій за маневрового режиму їх експлуатації – одна з важливих проблем інженерної практики [1]. Особливо це стосується енергетичного обладнання, елементів хімії і нафтохімії, металевих конструкцій мобільних машин тощо, які експлуатують за межами встановленого ресурсу. Найбільше обмеження ресурсу, обумовлене тривалим впливом високої температури, характерне для елементів паропроводів і парових турбін. У них за маневрового режиму (пуски-зупинки) експлуатації розвиваються тріщини високотемпературної повзучості, які ростуть до критичних розмірів, особливо під дією водневого чи корозивного середовищ. Це все призводить до катастрофічного руйнування цього обладнання. Щоб його передбачити і відвернути, виконують профілактичні огляди і діагностування. При цьому виявляють дефекти типу тріщин різних розмірів. Тому важливо вміти визначати період їх докритичного росту залежно від розмірів і просторової орієнтації.

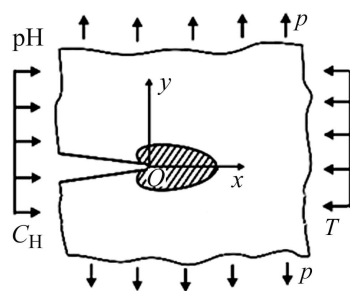


Рис. 1. Схема навантаження пластини.

Fig. 1. Shema of plane loading.

Нижче запропоновано розрахункові моделі (диференціальні рівняння, початкові і кінцеві умови) для оцінювання впливу агресивного середовища (водневого, корозивного) на період докритичного росту тріщин повзучості в елементах конструкцій (залишковий ресурс) за маневрового режиму експлуатації.

Постава задачі. Нехай елемент конструкції у вигляді пластини з прямолінійною тріщиною завдовжки l експлуатується за маневрового режиму і одночасної дії високотемпературного поля T ($T > 0,3T_p$, T_p – температура плавлення, $T = \text{const}$), через що в зоні передруйнування біля вершини тріщини виникає локальна повзучість (рис. 1). Під маневровим режимом розуміємо від-

хилення від усталеного (статичного навантаження) [2]. Окрім того, на пластину діють різні фізико-хімічні чинники, наприклад, водневе чи корозивне середовище. Задача полягає у розрахунку залишкової довговічності пластини.

Для її розв'язку побудуємо диференціальне рівняння, за яким визначимо кінетику поширення тріщини і час t_* , коли вона підросте до критичного розміру l_* і пластина зруйнується. При цьому застосуємо енергетичний підхід, в основі якого – перший закон термодинаміки про енергетичний баланс і баланс швидкостей змін енергетичних складових для елементарного акту поширення тріщини [3, 4]. Тоді кінетика росту тріщини

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\partial(W_1(t, C) - \Gamma)}{\partial t} \left[\gamma_C - \gamma_t - \frac{\partial W_2(l)}{\partial l} \right]^{-1}, \quad (1)$$

де $W_1(t, C)$ – енергія пластичних деформацій у результаті повзучості за розтягу зони передруйнування, яка виділяється за постійної довжини тріщини, генерується самим тілом і залежить від часу t та параметра C , що характеризує вплив зовнішнього середовища; $W_2(l)$ – енергія пластичних деформацій, яка виділяється за дії додаткових чинників, які змінюють усталений режим навантаження, і залежить тільки від довжини тріщини; Γ – енергія руйнування тіла, яка залежить від впливу агресивного середовища; γ_t – питома енергія пластичних деформацій у зоні передруйнування; γ_C – питома енергія руйнування тіла під час поширення тріщин.

Зовнішнє середовище не впливатиме на енергію $W_2(l)$ деформування тіла, а тому, використовуючи відомі результати [3, 4], моделюємо її інтегралом від суми енергій циклів, помножених на дельта-функцію Дірака:

$$W_2(l) = 0,25(1 - R)^4 \int_0^l \alpha_1 \sigma_t \sum_{i=1}^n \delta(x - l_i) \left[\delta_t^2(x) - \delta_{th}^2 \right] dx, \quad (2)$$

де σ_t – усереднені напруження в зоні передруйнування біля вершини тріщини; δ_t – розкриття зони передруйнування; δ_{th} – значення δ_t , за якого тріщина не поширюється; R – коефіцієнт асиметрії циклу навантаження; $\delta(x)$ – дельта-функція Дірака; α_1 – стала, яку визначають із експерименту; n – кількість відхилень навантаження від усталеного режиму; l_i – довжина тріщини після i -го підростання внаслідок зміни навантаження.

Таким чином, рівняння (1) з урахуванням (2) визначає кінетику поширення тріщини за маневрового режиму експлуатації і дії агресивного зовнішнього середовища. При цьому для кожного конкретного випадку необхідно визначити невідомі енергетичні складові $W_1(t, C)$; Γ ; γ_t і γ_C .

Вплив корозивного середовища на період докритичного росту тріщини в умовах підвищених температур за маневрового режиму зміни навантаження. Корозивне середовище пришвидшує ріст тріщин за локальної повзучості в елементах конструкцій під дією статичного навантаження, а отже, зменшує їх довговічність [5]. Проте все частіше інженерні конструкції працюють у маневровому режимі. Оцінимо вплив корозивного середовища на ріст тріщин в елементах конструкцій, що експлуатуються за таких умов.

Постава задачі і метод її розв'язання. Розглянемо пластину з прямолінійною тріщиною довжини l_0 , яка перебуває під дією корозивно-кислого середовища (електрохімічна корозія), навантаження p і високої температури T . Вважаємо, що зовнішнє навантаження p змінюється за деякі проміжки часу n разів (навантаження-розвантаження), тобто пластина знаходиться під дією маневрового режиму експлуатації. Необхідно знайти її залишкову довговічність, враховуючи зміну навантажень, тобто час t_* , з досягненням якого тріщина підросте до критичного розміру l_* і пластина зруйнується.

Для розв'язання задачі використаємо рівняння (1). При цьому за дії середовища з пониженою кислотністю необхідно визначити енергетичні складові, що входять у це рівняння. Їх знаходитимемо так [5]:

$$\partial\Gamma(t, C_H)/\partial t|_{t=\Delta t_C} \approx -0,25\alpha_0\sigma_t DB\sqrt[4]{(\Delta t_C)^{-3}i_{\max}}(\delta_t - \xi), \quad (3)$$

$$\partial W_1(t, C_H)/\partial t|_{t=\Delta t_C} \approx 2\alpha_0\sigma_t\dot{\delta}_t(0)\left[\delta_t(0) + \dot{\delta}_t(0) \cdot \Delta t_C(1 + \alpha_2 B\sqrt[4]{\Delta t_C i_{\max}})\right], \quad (4)$$

$$\gamma_t = \delta_t\sigma_t; \quad \gamma_C = \delta_{CC}\sigma_t, \quad (5)$$

де $\alpha_0, \alpha_2, B, D, \xi$ – константи, що визначають із експерименту; Δt_C – інкубаційний період підготовки стрибка тріщини; C_H – концентрація водню в зоні передруйнування біля вершини тріщини за корозії $C_H(\Delta t) = B\sqrt[4]{\Delta t i_{\max}}$; i_{\max} – густина анодного струму на поверхні вершини тріщини; δ_{CC} – критичне розкриття δ_t за корозійного руйнування, $\delta_{CC} = \delta_C - AB\sqrt[4]{\Delta t_C i_{\max}}$, A – константа, яку визначають експериментально, δ_C – критичне розкриття δ_t за повзучості матеріалу; $\dot{\delta}_t(0)$ – швидкість розкриття вершини тріщини за високотемпературної повзучості зони передруйнування, яку, як і в праці [6], подамо так:

$$2\alpha_0\dot{\delta}_t(0) = A_{2t}(K_I K_{IC}^{-1})^{2m}. \quad (6)$$

Тут A_{2t}, m – характеристики високотемпературної повзучості матеріалу, які визначають із експерименту.

Підставляючи співвідношення (2)–(6) у (1) і нехтуючи швидкість підростання тріщини за анодного розчинення від корозивного середовища, отримаємо рівняння для обчислення швидкості поширення тріщини (m/h) за локальної повзучості в корозивному середовищі з урахуванням маневреності роботи за підвищених температур:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{2\alpha_0\dot{\delta}_t + 2\alpha_0\dot{\delta}_t^{0,75}\alpha_2 B(1 - \delta_t\delta_C^{-1}) \cdot \sqrt[4]{(\delta_C - \delta_t)i_{\max}}}{1 - \delta_t\delta_C^{-1} - 0,25\alpha_1(1 - R)^4\delta_C^{-1}\sum_{i=1}^n \delta(l - l_i)[\delta_t^2(l) - \delta_{th}^2]}. \quad (7)$$

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

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*; \quad \delta_t(l_*) = \delta_C. \quad (8)$$

За макротріщини з урахуванням співвідношень $\delta_t\delta_C^{-1} = K_I^2 K_{IC}^{-2}$, $\delta_{th} = K_{th}^2\sigma_t^{-1}E^{-1}$, $\delta_t = K_I^2\sigma_t^{-1}E^{-1}$ і (6) математичну модель (7), (8) запишемо у вигляді

$$\frac{dl}{dt} = \frac{A_{2t}[K_I K_{IC}^{-1}]^{2m} + B_1[1 - K_I^2 K_{IC}^{-2}]^{1,25}[K_I K_{IC}^{-1}]^{1,5m}}{1 - K_I^2 K_{IC}^{-2} - 0,25\alpha_1(1 - R)^4(E\sigma_t)^{-1}K_{IC}^{-2}\sum_{i=1}^n \delta(l - l_i)[K_I^4(l) - K_{th}^4]}, \quad (9)$$

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*; \quad K_I(l_*) = K_{IC}. \quad (10)$$

Тут $B_1 = (2\alpha_0)^{0,25}\alpha_2 B(\sigma_t E)^{-0,25}A_{2t}^{0,75}i_{\max}^{0,25}\sqrt{K_{IC}}$.

Інтегруючи рівняння (9) за умов (10), отримаємо вираз для визначення періоду докритичного росту тріщин у пластині (залишковий ресурс), яка перебуває під дією підвищених температур, корозивного середовища і маневрового режиму експлуатації:

$$t_* = \int_{l_0}^{l_*} \frac{[1 - K_I^2 K_{IC}^{-2}] dl}{A_{2t} [K_I K_{IC}^{-1}]^{2m} + B_1 [1 - K_I^2 K_{IC}^{-2}]^{1,25} [K_I K_{IC}^{-1}]^{1,5m}} - \frac{\alpha_1 (1-R)^4}{4E\sigma_t K_{IC}^2} \cdot \frac{n}{l_* - l_0} \int_{l_0}^{l_*} \frac{[K_I^4 - K_{th}^4] dl}{A_{2t} [K_I K_{IC}^{-1}]^{2m} + B_1 [1 - K_I^2 K_{IC}^{-2}]^{1,25} [K_I K_{IC}^{-1}]^{1,5m}}. \quad (11)$$

Аналог задачі Гріффітса для поширення тріщини за маневрового режиму навантаження, дії підвищених температур та корозивно-кислого середовища. Нехай нескінченна металева пластина з тріщиною початкової довжини $2l_0$ знаходиться в корозивному середовищі, перебуває під дією високої температури T , що викликає в зоні передруйнування високотемпературну повзучість, та рівномірно розподіленого навантаження p , яке напрямлене перпендикулярно до площини розміщення тріщини. Вважаємо, що під час росту тріщини відбувається n разів навантажень-розвантажень. Потрібно визначити час $t = t_*$, за який тріщина підросе до критичного розміру $l = l_*$ і пластина зруйнується.

Для розв'язку задачі використаємо формулу (11), яка для $K_I = p\sqrt{\pi l}$ набуде вигляду

$$t_* = \int_{l_0}^{l_*} \frac{[1 - p^2 \pi l K_{IC}^{-2}] dl}{A_{2t} [p\sqrt{\pi l} K_{IC}^{-1}]^{2m} + B_1 [1 - p^2 \pi l K_{IC}^{-2}]^{1,25} [p\sqrt{\pi l} K_{IC}^{-1}]^{1,5m}} - \frac{\alpha_1 (1-R)^4}{4E\sigma_t K_{IC}^2} \cdot \frac{n}{l_* - l_0} \int_{l_0}^{l_*} \frac{[p^4 \pi^2 l^2 - K_{th}^4] dl}{A_{2t} [p\sqrt{\pi l} K_{IC}^{-1}]^{2m} + B_1 [1 - p^2 \pi l K_{IC}^{-2}]^{1,25} [p\sqrt{\pi l} K_{IC}^{-1}]^{1,5m}}. \quad (12)$$

Тут $l_* = p^{-2} \pi K_{IC}^2$.

Рис. 2. Залежність $t_* \sim p$ для пластины за різних видів навантаження:
1 – статичне;
2 – маневровий режим експлуатації;
3 – статичне за дії корозивного середовища;
4 – маневровий режим експлуатації за дії корозивного середовища.

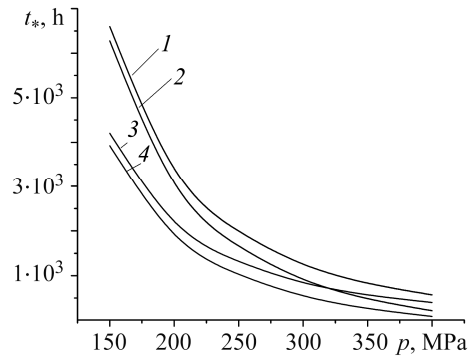


Fig. 2. Dependence $t_* \sim p$ for the plate for different types of load: 1 – static load; 2 – maneuver operation mode; 3 – static load under the action of corrosion environment; 4 – maneuver operation mode under the action of corrosion environment.

Зі співвідношення (12) можна розрахувати час до руйнування пластины. Далі, для прикладу, розглянемо пластину, виготовлену з аустенітної сталі (18% Mn, 5% Cr, 0,5% C, 0,5% Si, 0,1% Ni, решта – Fe) [7]. На основі експериментальних досліджень [7] (за діаграмами поширення тріщин у воді при 90°C) визначимо механічні характеристики сталі, що входять у рівняння (12): $B_1 = 3,28 \cdot 10^{-5}$ м/х, $K_{IC} = 146$ МПа $\sqrt{\text{м}}$, $A_{2t} = 5,112 \cdot 10^{-5}$ м/х, $m = 0,52$, $\sigma_t = 1200$ МПа, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\alpha_1 = 4$, $K_{th} = 8,2$ МПа $\sqrt{\text{м}}$. Початковий розмір тріщини $l_0 = 5$ мм, $n = 455$. Підставивши ці дані у співвідношення (12), розрахуємо залишковий ресурс t_* пластины

за вказаних вище умов експлуатації і побудуємо його залежність від навантаження p за маневрового режиму експлуатації і дії корозивного середовища (рис. 2, крива 4). Водночас за співвідношенням (12) отримали залежності ресурсу пластини від статичного навантаження і високих температур (крива 1), маневрового режиму експлуатації за високих температур (крива 2), статичного навантаження і дії корозивного середовища за підвищених температур (крива 3). Вони свідчать, що корозивне середовище суттєво зменшує залишкову довговічність пластини t_* (в 1,6 рази), особливо за маневрового режиму експлуатації (в 1,6–2,3 рази залежно від прикладеного навантаження).

Вплив водню на залишкову довговічність труби паропроводу за маневрового режиму експлуатації. Розглянемо задачу про ріст внутрішньої поверхневої півеліптичної тріщини високотемпературної повзучості в стінці труби паропроводу за її наводнювання і внутрішнього тиску p під час маневрового режиму експлуатації. Необхідно визначити час t_* , коли тріщина підросе до критичного розміру і труба розгерметизується.

Узагальнимо рівняння (1) для тривимірної задачі

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial W_1(t, C_0)}{\partial t} \left[\gamma_C - \gamma_t - \frac{\partial W_2}{\partial S} \right]^{-1}, \quad (13)$$

$$t = 0, \quad S(0) = S_0; \quad t = t_*, \quad S(t_*) = S_*, \quad (14)$$

де S – площа тріщини, а енергію деформування, використовуючи відомі результати [8], запишемо так:

$$W_1(t, C_0) = \alpha_0 \sigma_t \left[\delta_t(0, 0, 0) + \dot{\delta}_t(0) t (1 + \beta_1 \beta_2 C_0 t) \right]^2, \quad (15)$$

де β_1, β_2 – характеристики наводнювання матеріалу.

Щоб спростити розв'язок рівняння (13), не втрачаючи при цьому потрібної для інженерної практики точності, застосуємо метод еквівалентних площ [9], згідно з яким зміна площі тріщини реальної конфігурації буде наближено така ж, як для півкругової радіуса ρ ($\rho = \sqrt{ab}$; a, b – півосі півеліптичної тріщини) такої ж початкової площі. При цьому вважаємо, що швидкість поширення півколової тріщини у всіх точках її контуру однакова. Таким чином, інтегруючи рівняння (13) за умов (14) з урахуванням вищенаведеного та формул (15), (2), оцінимо залишковий ресурс труби паропроводу:

$$t_* = \int_{\rho_0}^{\rho_*} \frac{1 - K_I^2 K_{IC}^{-2}}{\rho_0 A_{2t} \left[K_I K_{IC}^{-1} \right]^{2m} + 8\alpha_1 \beta_1 \beta_2 C_0 (\sigma_t E)^{-1} \left[K_{IC}^2 - K_I^2 \right]} d\rho - \frac{0,25\alpha_1 (1-R)^4}{\sigma_t E K_{IC}^2} \cdot \frac{n}{\rho_* - \rho_0} \int_{\rho_0}^{\rho_*} \frac{\left[K_I^4 - K_{th}^4 \right]}{\rho_0 A_{2t} \left[K_I K_{IC}^{-1} \right]^{2m} + 8\alpha_1 \beta_1 \beta_2 C_0 (\sigma_t E)^{-1} \left[K_{IC}^2 - K_I^2 \right]} d\rho. \quad (16)$$

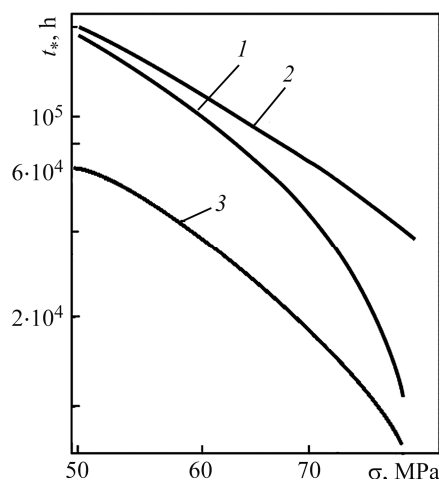
Тут $K_I = 0,7\sigma\sqrt{\pi\rho}(1 + 0,32(\rho h^{-1})^2)(1,04 + 0,23(\rho h^{-1})^2 - 0,11(\rho h^{-1})^4)$ [10], $\sigma = pr/h$; r – радіус труби; h – товщина її стінки.

Розрахуємо довговічність труби паропроводу зі сталі 12Х1МФ з такими механічними характеристиками і геометричними параметрами [2]: $n = 886$, $\rho_0 = 45$ mm, $r = 162$ mm, $h = 60$ mm, $\sigma_t = 520$ МПа, $K_{IC} = 185$ МПа \sqrt{m} , $R = 0$, $A_{2t} = 8 \cdot 10^{-7}$ m/h, $\alpha_1 = 1,2$, $m = 2,3$, $K_{th} = 6,2$ МПа \sqrt{m} , $E = 1,6 \cdot 10^5$ МПа, $\beta_2 = 0,48(h)^{-1}$, $\alpha_0 = 5 \cdot 10^{-3}$, $\beta_1 = 2,22$ (ppm) $^{-1}$, $C_0 = 0,9$ ppm. Підставляючи їх у формулу (16), побудували

(рис. 3) залежності залишкової довговічності труби від середнього напруження σ в її стінці за стаціонарного (крива 2), маневрового (крива 1) і маневрового з урахуванням наводнювання стінки (крива 3) режимів експлуатації. Найменші значення залишкової довговічності труби отримали за маневрового режиму експлуатації і наводнювання. У цьому випадку залишкова довговічність зменшується втричі.

Рис. 3. Залежності залишкової довговічності t_* труби паропроводу від середнього напруження σ у його стінці для різних режимів експлуатації: 2 – стаціонарний; 1, 3 – маневровий і маневровий з урахуванням наводнювання стінки.

Fig. 3. Dependence of the residual lifetime t_* of the pipe of the steam pipeline on the average stress σ in its wall for different operation modes: 2 – stationary; 1, 3 – maneuver and maneuver taking into account the hydrogenation of the wall.



ВИСНОВКИ

За енергетичним підходом механіки руйнування отримано кінетичне рівняння для визначення кінетики поширення тріщин в умовах дії агресивного середовища за маневрового режиму експлуатації елементів конструкцій. Побудовано моделі для розрахунку періоду докритичного росту тріщин повзучості під впливом підвищених температур, маневрового режиму навантаження, водневмісного і корозивного середовищ. На прикладі аналога задачі Гріффітса про поширення тріщин у корозивно-кисломому середовищі встановили, що за маневрового режиму залишкова довговічність пластини за цих умов зменшується від 1,6 до 2,3 разів.

За залежностями залишкової довговічності труби паропроводу від середнього напруження в його стінці за стаціонарного, маневрового і маневрового з урахуванням наводнювання стінки режимів експлуатації виявили, що найменшу довговічність труби спричинили маневровий режим і наводнювання (до трьох разів).

РЕЗЮМЕ. Сформулирован энергетический подход для определения кинетики роста трещин при маневренном режиме эксплуатации оборудования и влияния рабочей среды. Разработаны расчетные модели для оценки воздействия коррозионной и водородосодержащих сред на период докритического роста трещины ползучести при маневренном режиме эксплуатации.

SUMMARY. The energy approach for determining the kinetics of cracks growth for maneuvering regime of equipment operation and influence of working environment is formulated. Calculation models for estimating the influence of corrosive and hydrogen-containing media on the period of creep cracks subcritical growth under maneuvering regime of operation are developed.

1. Андрейків О. Є., Скальський В. Р., Долінська І. Я. Заповільнене руйнування матеріалів за локальної повзучості. – Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2017. – 400 с.
2. Хромченко Ф. А. Ресурс сварных соединений паропроводов. – М.: Машиностроение, 2002. – 352 с.
3. Розрахункова модель для визначення періоду докритичного росту тріщин повзучості в елементах конструкцій за довготривалими статично-розривними навантаженнями

- / О. Є. Андрейків, І. Я. Долінська, В. З. Кухар, Ю. Я. Матвіїв // Доп. НАН України. – 2012. – № 4. – С. 50–56.
4. *Андрейків О. Є., Долінська І. Я., Кухар В. З.* Математична модель для визначення довговічності пластин з системами тріщин за довготривалого статично-розривного навантаження і високої температури // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* – 2012. – **55**, № 2. – С. 63–70.
(*Andreikiv O. E., Dolins'ka I. Y., Kukhar V. Z.* A mathematical model for determining the lifetime of plates with systems of cracks under long-term static breaking loads and high temperatures // *J. of Mathematical Sciences.* – 2013. – **192**, № 5. – P. 555–564.)
5. *Розрахункова* модель поширення корозійно-механічної тріщини за високих температур / О. Є. Андрейків, І. Я. Долінська, А. Р. Лисик, Н. Б. Сас // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2016. – **52**, № 5. – С. 99–105.
(*Computational* model of the propagation of stress-corrosion cracks at high temperatures / O. E. Andreikiv, I. Ya. Dolins'ka, A. R. Lysyk, N. B. Sas // *Materials Science.* – 2017. – **52**, № 5. – P. 714–721.)
6. *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., 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.)
7. *Speidel M.* Stress corrosion cracking in Fe–Mn–Cr alloys // *Corr.* – 1976. – **32**, № 5. – P. 187–190.
8. *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., Dobrovol's'ka L. N., 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.)
9. *Андрейкив А. Е.* Пространственные задачи теории трещин. – К.: Наук. думка, 1982. – 348 с.
10. *Вплив* водню на залишковий ресурс труби газопроводу за маневрового режиму експлуатації / О. Є. Андрейків, І. Я. Долінська, В. З. Кухар, І. П. Штойко // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2015. – **51**, № 4. – С. 59–66.
(*Influence* of hydrogen on the residual service life of a gas pipeline in the maneuvering mode of operation / O. E. Andreikiv, I. Ya. Dolinska, V. Z. Kukhar, I. P. Shtoiiko // *Materials Science.* – 2016. – **51**, № 4. – P. 500–508.)

Одержано 14.12.2017