

УДК 620.197.5: 669.788

ВПЛИВ ҐРУНТОВОЇ КОРОЗІЇ І ТРАНСПОРТОВАНИХ ПРОДУКТІВ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ НАФТОГАЗОПРОВІДІВ

О. Є. АНДРЕЙКІВ¹, О. В. ГЕМБАРА²

¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка;

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

Розроблено методику оцінювання довговічності зварних з'єднань труб нафтогазопроводів, яка враховує дію основних експлуатаційних чинників на швидкість корозії. Кількісно проаналізовано вплив водню, що виділяється з транспортованих продуктів, на швидкість ґрунтової корозії та залишкову довговічність різних зон зварних з'єднань підземних труб.

Ключові слова: ґрунтова корозія, зварні з'єднання, наводнювання матеріалу, швидкість корозії, корозійно-статичний ріст тріщини, залишкова довговічність.

Відомо, що швидкість корозії зварних з'єднань (ЗЗ) більша, ніж основного металу (ОМ), й у багатьох випадках від їх міцності залежить ресурс усієї конструкції. Складні процеси у зонах ЗЗ і їхній вплив на корозію досліджували раніше [1–5]. Спостерігали електрохімічну неоднорідність поверхні на ділянці ОМ–зона термічного впливу (ЗТВ)–шов [3]. Виявили [4, 5], що метал шва (МШ) тепло-травних сталей деградує інтенсивніше проти інших зон ЗЗ, через що з часом його твердість, міцність і пластичність стають нижчими, ніж ОМ та ЗТВ. Така гетерогенність, очевидно, і спричиняє різні швидкості корозії окремих ділянок ЗЗ. Тому розрахунки довговічності металевих конструкцій та їхніх ЗЗ повинні ґрунтуватися на результатах випробувань зразків і моделювання кінетики корозійного процесу з урахуванням наводнювання різних зон ЗЗ.

Використовуючи відомі теоретичні концепції і деякі експериментально обґрунтовані гіпотези, побудували [6–8] фізико-хімічну модель і встановили математичні співвідношення для опису корозійно-механічного руйнування матеріалів труб підземних нафтогазопроводів з урахуванням інтенсифікації цього процесу дифузійно-рухливим воднем. Виявили, що абсорбований металом водень більше ніж удвічі збільшує швидкість корозії, а отже, майже у стільки ж разів зменшує його залишкову довговічність. Тут цей підхід застосовано для кількісної оцінки впливу наводнювання на швидкість ґрунтової корозії та залишкову довговічність ЗЗ.

Формулювання задачі. Розглянемо частину труби газопроводу зі зварним швом (рис. 1а), яка пролягає в глинистих і піщаних ґрунтах, тобто в умовах нерівномірної аерації, де виникають гальванічні корозійні зони: на глинистій ділянці – анодна, а на піщаній – катодна. Метал руйнується на ділянках, де утруднений доступ кисню.

У середині труби знаходяться під тиском водневовмісне нафтове або газове середовища, які можуть адсорбуватися на її поверхні, дисоціювати і наводнювати її стінку. В найбільш корозійно-активній зоні (анодній) на зовнішній поверхні є півеліптична тріщина з початковими розмірами a_0 , b_0 (її глибина b_0 збігається з піввіссю еліпса по товщині труби), яка може рости, розвиватися і досягти внутріш-

Контактна особа: О. В. ГЕМБАРА, e-mail: hembra@ipm.lviv.ua

ньої поверхні труби, розгерметизовуючи її. Визначимо залишковий ресурс труби, тобто час $t = t_*$ до її розгерметизації, коли тріщина розташована в ОМ, МШ і ЗТВ.

Визначення довговічності трубопроводу. Оскільки кінетичній діаграмі корозійно-статичного росту тріщини властива платоподібна ділянка – після старту швидкість її росту практично не залежить від біжучого значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_I , то з невеликою похибкою можна вважати, що тріщина поширюється весь час з постійною швидкістю і довговічність

$$t_* = (h - b_0)/V, \quad (1)$$

де h – товщина стінки трубопроводу.

Тоді швидкість її руху

$$V = V_{\text{mech}} + V_{\text{corr}} = (\Delta I_{\text{mech}} + \Delta I_{\text{corr}})/t_*, \quad (2)$$

де швидкість анодного розчинення з урахуванням потоку водню [6]

$$V_{\text{corr}} = M(n\rho Ft)^{-1} \times \left[\int_0^t \frac{2a\pi^{-1}(\varphi_0 - \varphi_1)}{R_0(x^2 - a^2) + 2a\pi^{-1}k_1(\varphi_0 - \varphi)[1 - \exp(-\xi mtF^{-1})]} dt + FD \int_0^t \frac{\partial C}{\partial x} dt \right], \quad (3)$$

а параметр V_{mech} відомий [7]. Тут $2a$ – ширина смугоподібної пошкоди поверхні; φ_0, φ_1 – потенціали поверхні металу і пошкоди; R_0 – омичний опір; k_1, ξ – коефіцієнти пропорційності, які знаходять експериментально для кожної пари метал-електроліт; M – атомна маса водню; n – валентність металу; ρ – його густина; F – число Фарадея; D – коефіцієнт дифузії водню; C – його концентрація.

Визначення концентрації водню на ділянці 33. Щоб знайти швидкість анодного розчинення поверхні за формулою (3), необхідно спочатку обчислити концентрацію водню $C(x, y, t)$ у різних зонах 33, зокрема у МШ, ЗТВ та ОМ. Тому, формулюючи дифузійну задачу, 33 моделювали кусково-неоднорідною смугою, що з одного боку контактує із водневомісним середовищем (рис. 1b). На межі переходу між зонами функція розчинності водню матиме стрибок, а отже, матиме стрибок і функція концентрації водню, що впливає із умови неперервності хімічного потенціалу водню на всій ділянці [9]. Це суттєво ускладнює постанову дифузійної задачі. Тому замість концентрації водню ввели неперервну на всій ділянці 33 функцію його потенціалу Π :

$$\Pi(x, y, t) = C(x, y, t)/K_S(x, y, t), \quad (4)$$

де K_S – коефіцієнт розчинності водню в металі.

Розподіл поля концентрацій водню у 33 шукали за узагальненим законом Фіка, який тут набуває виду

$$\frac{\partial \Pi}{\partial t} = D(T(t)) \left[\bar{\nabla}_{xy}^2 \Pi + \frac{V_H}{RT} \text{grad } \sigma_h \cdot \text{grad } \Pi \right] - \frac{1}{K_S(T(t))} \frac{\partial K_S(T(t))}{\partial t} \Pi, \quad (5)$$

з початковою умовою

$$\Pi(x, y, t_0) = \Pi_0(x, y). \quad (6)$$

Вважаючи, що на межі 33 із зовнішнім середовищем відбувається масообмін за законом Ньютона, задамо граничні умови в такому вигляді:

$$-\partial \Pi / \partial \bar{n} = \alpha_H \left(\Pi - \sqrt{p_H} \right), \quad (7)$$

де p_H – парціальний тиск водню у зовнішньому середовищі; α_H – коефіцієнт масообміну на межі ділянки зі середовищем. Висоту пластини L вибрали достатньо великою (рис. 1b), щоб знехтувати дифузійні потоки в напрямку осі Ox . Гранична умова на межі тіла $x = L$ буде:

$$\partial \Pi / \partial x = 0. \quad (8)$$

Якщо вибрати систему координат так, щоб розглядувана ділянка була симетрична відносно осі Oy (рис. 1b), то задачу дифузії водню достатньо розв'язувати лише для ділянки над цією віссю, задавши умову симетрії.

Розроблено [10] ефективний підхід для визначення залишкових напружень біля зварних швів у трубопроводах і описано методи діагностування напруженого стану в зоні кільцевого багатошарового зварного шва магістрального трубопроводу “Більче–Волиця–Долина” на переході через р. Стрий (діаметр $1420 \times 22,5$ mm; матеріал труби – сталь X70). Для отримання експериментальних даних використали електромагнетний метод і прилад “MESTR-411” з чотириполюсним накладним електромагнетним перетворювачем трансформаторного типу. Для опрацювання експериментальних результатів застосували затверджену Комітетом зі стандартизації ТК-78 методику вимірювань механічних напружень.

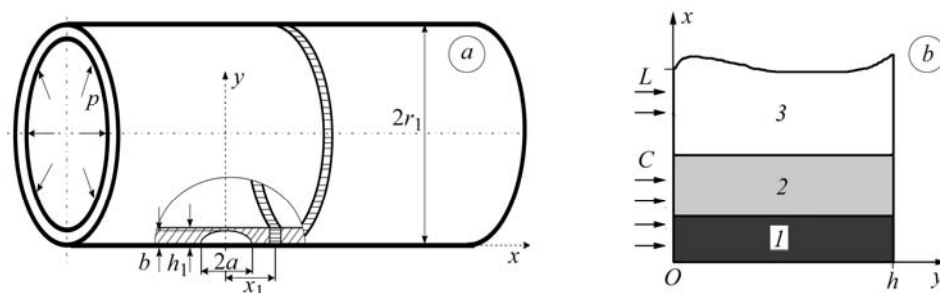


Рис. 1. Схеми навантаження зварного з'єднання трубопроводу з тріщиною (a) і модельної пластини (b): 1 – МШ; 2 – ЗТВ; 3 – ОМ.

Fig. 1. Schemes of loading of the pipeline welded joint with a crack (a) and a model plate (b): 1 – weld metal (WM); 2 – heat affected zone (HAZ); 3 – base metal (BM).

За експериментальними даними [11–14] побудували залежність колових залишкових напружень на внутрішній (σ_r^2) і зовнішній (σ_r^1) поверхнях труби від відстані x_1 від центра тріщини до осі зварного шва трубопроводу (рис. 2):

$$\sigma_r^{(1)} = \frac{48,13 - 2408,68 x_1}{1 - 109,53 x_1 + 3639 x_1^2}, \quad \sigma_r^{(2)} = \frac{34,01 - 1691 x_1}{1 - 108,02 x_1 + 3541 x_1^2}. \quad (9)$$

Середні значення залишкових напружень у стінці труби визначали за формулою

$$\sigma_r(x_1) = 0,5(\sigma^{(1)} + \sigma^{(2)}), \quad (10)$$

а загальні $\sigma(x_1)$ дорівнювали сумі залишкових і напружень від внутрішнього тиску p , тобто

$$\sigma(x_1) = \sigma_r(x_1) + p r_1 h_1^{-1}. \quad (11)$$

Таким чином, рівняння (5) із початковою та граничними умовами (6)–(8) – коректно поставлена задача дифузії водню у ЗЗ під час наводнювання, яку розв'язували методом скінчених елементів за просторовими змінними та скінченно-різницею за часовою змінною [9].

Розрахунок залишкової довговічності тривало експлуатованої ділянки магістрального газопроводу “Уренгой–Помари–Ужгород” біля кільцевого зварного шва. Газопровід побудований з труб двох виробників: зі сталі X60 – Японія (товщина стінки труби 18,7 mm) і X70 – Харцизький трубний завод (товщина стінки 15,7 mm) і перебував під катодним захистом: поляризаційний потенціал на обстежуваній ділянці дорівнював, в основному, $-1,3$ V відносно мідно-сульфатного електрода порівняння. Склад транспортованого газу (в %): 98,6 CH_4 ; 0,1 C_2H_6 ; 0,5 CO_2 ; 1,3 N_2 [6].

З розв'язку задачі дифузії (4)–(11) визначимо розподіл концентрації водню у зонах ЗЗ після 100 h наводнювання за тиску водню 7 МПа та температури 20°C ($h = 2 \cdot 10^{-2}$ m, $L = 4 \cdot 10^{-2}$ m, мінімальна площа одного скінченного елемента не більше 0,1 mm²) (рис. 3). Подано (табл. 1) фізико-механічні характеристики матеріалів різних зон ЗЗ, які використовували під час розрахунків: коефіцієнти дифузії D і розчинності K_S водню, значення корозійно-статичної тріщиностійкості K_{IH} , швидкість корозії V_{mech} .

Таблиця 1. Фізико-механічні властивості матеріалів різних зон ЗЗ

Зони	D , m ² /s	K_S , ppm·√МПа	K_{IH} , МПа·√m	V_{mech} , mm/h
Сталь Х60				
ОМ	$8,4 \cdot 10^{-11}$	0,54	101	0,0017
МШ	$8,3 \cdot 10^{-10}$	1,56	–	–
ЗТВ	$1,7 \cdot 10^{-10}$	0,9	–	–
Сталь Х70				
ОМ	$6,4 \cdot 10^{-11}$	0,94	57	0,0055
МШ	$5,8 \cdot 10^{-10}$	1,92	–	–
ЗТВ	$1,5 \cdot 10^{-10}$	1,56	–	–

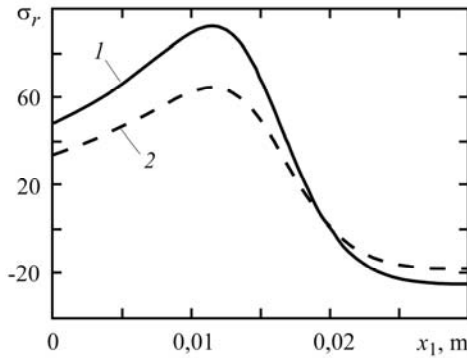


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Залежність залишкових напружень від віддалі x_1 до осі зварного шва: 1 – на зовнішній поверхні труби; 2 – на внутрішній.

Fig. 2. Dependence of residual stresses on distance x_1 to the weld axis: 1 – on the pipe external surface; 2 – on the internal surface.

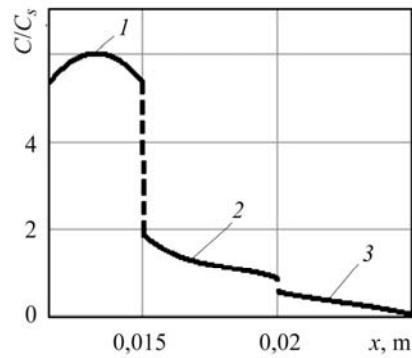


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Розподіл відносної концентрації водню у ЗЗ: 1 – МШ; 2 – ЗТВ; 3 – ОМ.

Fig. 3. Distribution of hydrogen relative concentration in the welded joint: 1 – WM; 2 – HAZ; 3 – BM.

Вживаючи значення V_{mech} з таблиці і схему розрахунків V_{corr} , описану раніше [6], за співвідношеннями (1), (2) визначили швидкість корозії різних зон ЗЗ (рис. 4a, c) та залишкову довговічність (рис. 4b, d) ділянки трубопроводу з півеліптичною тріщиною, розташованою у різних зонах ЗЗ, залежно від її початкової глибини b_0 в умовах ґрунтової корозії з урахуванням наводнювання стінки за статичного навантаження.

Вплив тривалої експлуатації на циклічну тріщиностійкість деградованого зварного з'єднання. Експлуатаційна деградація ЗЗ сталі Х70 [15] неоднозначно впливає на поріг циклічної тріщиностійкості ΔK_{th} ОМ та МШ за випробувань у повітрі: за малої асиметрії значення ΔK_{th} експлуатованого металу знижуються, тоді як за великої – підвищуються (табл. 2). Очевидно, за малої асиметрії і, відповідно, малого радіуса статичної пластичної зони метал окрихчується через деградацію. За великої асиметрії, а отже, великого радіуса цієї зони вже перева-

жає релаксувальний вплив вторинного розтріскування деградованого металу в зоні передруйнування.

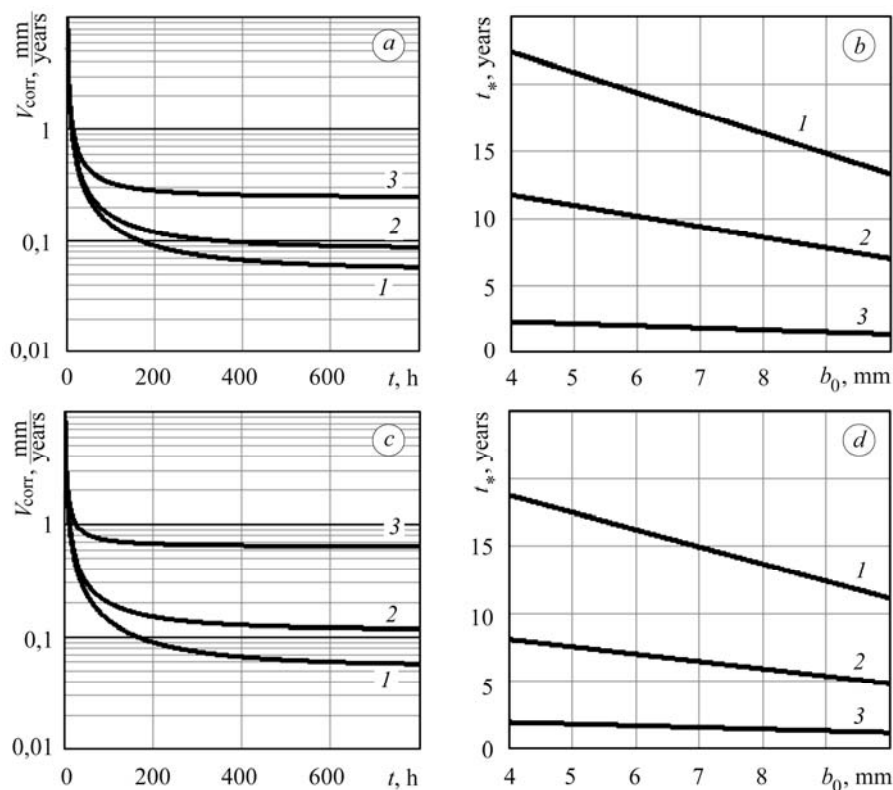


Рис. 4. Швидкість корозії (a, c) свіжоутвореної поверхні у різних зонах ЗЗ та їх залишкова довговічність (b, d) для сталей X60 (a, b) і X70 (c, d): 1 – ОМ; 2 – ЗТВ; 3 – МШ.

Fig. 4. Corrosion rate of (a, c) of new-formed surface in the different areas of WJ and their residual lifetime (b, d) for X60 (a, b) and X70 steels (c, d): 1 – BM; 2 – HAZ; 3 – WM.

Таблиця 2. Характеристики циклічної тріщиностійкості сталі X70 [15]

Зона ЗЗ	ΔK_{th} , МПа· \sqrt{m}	ΔK_{SCC} , МПа· \sqrt{m}	V_{SCC} , m/cycle
$R = 0,1$			
ОМ	$\frac{6,3}{5,0}$	$\frac{7,5}{6,2}$	$\frac{1,3 \cdot 10^{-7}}{1,4 \cdot 10^{-6}}$
МШ	$\frac{5,3}{4,4}$	$\frac{7,8}{5,8}$	$\frac{1,8 \cdot 10^{-7}}{3,1 \cdot 10^{-6}}$
$R = 0,5$			
ОМ	$\frac{3,5}{4,1}$	$\frac{5,3}{5,1}$	$\frac{2,5 \cdot 10^{-7}}{6,1 \cdot 10^{-6}}$
МШ	$\frac{3,2}{3,6}$	$\frac{4,5}{3,7}$	$\frac{5,0 \cdot 10^{-7}}{8,5 \cdot 10^{-6}}$

Примітка: в чисельнику – дані для вихідного стану, в знаменнику – для експлуатованої труби.

Експлуатаційна деградація ЗЗ практично не змінює характеристик циклічної тріщиностійкості ОМ у середовищі за потенціалу корозії, незалежно від асиметрії циклу навантаження. Проте виявлено чутливість до деградації циклічної тріщиностійкості МШ у донній воді за потенціалу корозії та асиметрії циклу навантаження 0,5 (платоподібна ділянка інтенсифікації швидкості росту втомної тріщини на прямолінійній ділянці кінетичної діаграми втомного руйнування; рис. 5).

Під час поміркованого наводнення за катодної поляризації тривала експлуатація негативно впливає на характеристики циклічної тріщиностійкості і ОМ і, особливо, МШ, зокрема, поріг корозійної

тріщиностійкості за циклічного навантаження ΔK_{SCC} та швидкість росту тріщини на платоподібній ділянці V_{SCC} (табл. 2; рис. 5). Особливо суттєво деградація проявляється під час випробувань за великої асиметрії навантаження. Для ОМ за $R = 0,1$ швидкість росту тріщини зростає в два рази, а при $R = 0,5$ – майже втричі (табл. 2). Для МШ ефект експлуатаційної деградації виражений сильніше.

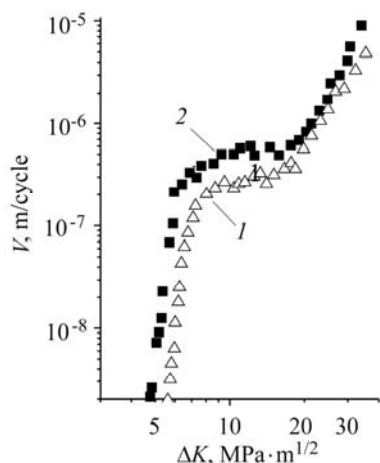


Рис. 5. Fig. 5.

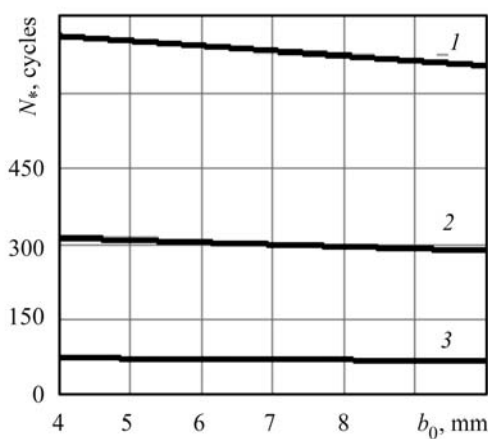


Рис. 6. Fig. 6.

Рис. 5. Кінетичні діаграми втомного руйнування ОМ (1) та МШ (2) 33 зі сталі X70 у донній воді за катодного потенціалу $E = -1,3$ V та асиметрії навантаження $R = 0,5$ [15].

Fig. 5. Fatigue fracture kinetic diagrams of BM (1) and WM (2) of WJ of X70 steel in the ground water for cathodic potential $E = -1.3$ V and stress ratio $R = 0.5$ [15].

Рис. 6. Залишкова довговічність тривало експлуатованої ділянки трубопроводу зі сталі X70: 1 – ОМ; 2 – ЗТВ; 3 – МШ.

Fig. 6. Residual lifetime of long-term exploited pipeline region of X70 steel: 1 – BM; 2 – HAZ; 3 – WM.

Побудовано (рис. 6) залежність залишкової довговічності тривало експлуатованої ділянки трубопроводу з півеліптичною тріщиною, розташованої у різних зонах ЗЗ, від її початкової глибини b_0 в умовах ґрунтової корозії з урахуванням наводнювання стінки за циклічного навантаження ($R = 0,5$) [7].

ВИСНОВКИ

Запропоновано просту для використання інженерну методику, за якою можна розрахувати швидкість корозії і залишковий ресурс зварних з'єднань труб нафтогазопроводів і яка враховує вплив основних експлуатаційних чинників на швидкість корозії. Встановлено, що у зварних з'єднаннях (особливо в МШ) швидкість ґрунтової корозії за наявності водневомісних нафтогазових середовищ більша, ніж в основному металі, що спричиняє меншу довговічність труб нафтогазових трубопроводів. Оскільки у багатьох випадках від міцності зварних з'єднань залежить ресурс усієї конструкції, то це слід враховувати, оцінюючи довговічність трубопроводу.

РЕЗЮМЕ. Разработана методика оценки долговечности сварных соединений труб нефтегазопроводов, учитывающая влияние основных эксплуатационных факторов на скорость коррозии. Количественно оценено влияние водорода, который выделяется из транспортируемых продуктов, на скорость почвенной коррозии и остаточную долговечность разных зон сварных соединений труб подземных нефтегазопроводов.

SUMMARY. The method of lifetime estimation of the pipes welded joints of oil and gas pipelines is developed. It takes into account the influence of basic operating factors on corrosion

rate. The influence of hydrogen released from the transported products on the soil corrosion rate and residual lifetime of different areas of the welded joints of underground oil and gas pipelines pipes is numerically evaluated.

1. *Корозійно-механічне руйнування зварних конструкцій* / В. І. Похмурський, Р. К. Мелехов, Г. М. Круцан, В. Т. Здановський. – К.: Наук. думка, 1995. – 264 с.
2. *Методика оцінки корозійного ресурсу зварних з'єднань конструкційних сталей* / Т. І. Матченко, Л. Б. Шаміс, П. Т. Матченко та ін. // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2010. – Вип. 14. – С. 78–84.
3. *Вплив інгібіторної обробки на корозійну тривкість зон зварного з'єднання* / З. В. Слободян, В. І. Кирилів, Л. А. Маглатюк та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – **45**, № 1. – С. 120–122.
(*Slobodyan Z. V., Kyryliv V. I., Mahletyuk L. A., and Kypovych R. V.* Influence of the inhibitor treatment on the corrosion resistance of the different zones of welded joints // *Materials Science*. – 2009. – **45**, № 1. – P. 136–139.)
4. *Деградація зварних з'єднань парогонів теплоелектростанцій у наводнювальному середовищі* / Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, Т. Р. Дзюба та ін. // Там же. – 2004. – **40**, № 6. – С. 105–110.
(*Nykyforchyn H. M., Student O. Z., Dzioba I. R., Stepanyuk S. M., Markov A. D., and Onyshechak Ya. D.* Degradation of welded joints of steam pipelines of thermal electric power plants in hydrogenating media // *Ibid*. – 2004. – **40**, № 6. – P. 836–843.)
5. *Деградація механічних властивостей металу зварного з'єднання експлуатованого магістрального газопроводу* / М. Греділь, О. Цирульник, О. Звірко та ін. // Вісник ТНТУ. – 2011. – Спецвип. – Ч. 1. – С. 63–66.
6. *Гембара О. В., Андрейків О. Є.* Вплив наводнювання стінок нафтових та газових трубопроводів на їх ґрунтову корозію і довговічність // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 5. – С. 27–34.
(*Hembara O. V. and Andreikiv O. E.* Effect of hydrogenation of the walls of oil-and-gas pipelines on their soil corrosion and service life // *Materials Science*. – 2011. – **47**, № 5. – P. 598–607.)
7. *Розрахунок залишкової довговічності тривало експлуатованої ділянки магістрального газопроводу* / О. Є. Андрейків, О. В. Гембара, О. Т. Цирульник, Л. І. Ниркова // Там же. – 2012. – **48**, № 2. – С. 103–110.
(*Andreikiv O. E., Hembara O. V., Tsyryl'nyk O. T., and Nyrkova L. I.* Evaluation of the residual lifetime of a section of a main gas pipeline after long-term operation // *Ibid*. – 2012. – **48**, № 2. – P. 231–238.)
8. *Оцінка локального пошкодження труб магістральних газопроводів в умовах ґрунтової корозії* / О. Є. Андрейків, О. В. Гембара, О. Т. Цирульник, Л. І. Ниркова // Там же. – 2012. – Спец. вип. № 9. – С. 636–641.
9. *Андрейків О. Є., Гембара О. В.* Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у воденьвмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 343 с.
10. *Діагностування залишкових напружень у нафтогазопроводах в околі кільцевих зварних швів розрахунково-експериментальним методом* / В. А. Осадчук, А. В. Драгілев, Ю. В. Банахевич, В. В. Пороховський // *Машинознавство*. – 2003. – № 11. – С. 23–27.
11. *Банахевич Ю. В., Андрейків О. Є., Кім М. Б.* Визначення залишкового ресурсу нафтопроводу з тріщиною поблизу зварного шва // Там же. – 2007. – № 8. – С. 8–12.
12. *Банахевич Ю. В., Андрейків О. Є., Кім М. Б.* Вплив розташування відносно зварного шва поверхневої тріщини в стінці труби на залишкову довговічність зварного з'єднання // *Наук. вісник ІФНТУНГ*. – 2007. – № 2 (16). – С. 108–112.
13. *Банахевич Ю. В., Андрейків О. Є., Кім М. Б.* Визначення залишкового ресурсу зварного з'єднання трубопроводу з поверхневою тріщиною // *Машинознавство*. – 2008. – № 12. – С. 11–14.
14. *Банахевич Ю. В., Андрейків О. Є., Кім М. Б.* Прогнозування залишкового ресурсу трубопроводу з урахуванням експлуатаційних умов навантаження // *Проблеми міцності*. – 2009. – № 1. – С. 44–52.
15. *Андрейків О. Є., Кушнір Р. М., Цирульник О. Т.* Методи оцінки залишкового ресурсу і характеристик зварних з'єднань труб магістральних нафтопроводів: Цільова комплексна програма НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин” // *Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2007–2009 рр.* – К.: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. – 2009. – С. 399–403.

Одержано 20.11.2012