

УДК 620.191.33: 620.193

ОЦІНЮВАННЯ КІНЕТИКИ РУЙНУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕКСПЛУАТОВАНОГО ГАЗОПРОВОДУ

Є. І. КРИЖАНІВСЬКИЙ¹, Р. С. ГРАБОВСЬКИЙ¹,
І. Я. ФЕДОРОВИЧ¹, Р. А. БАРНА²

¹ Національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ;

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

Експериментально підтверджено ефективність аналітично-числової методики оцінки кінетики та зміни форми корозійно-втомних тріщиноподібних дефектів під час їх розвитку в стінці трубопроводу. Запропоновано розрахунково-експериментальну методику оцінювання умов руйнування газопроводів тривалої експлуатації із урахуванням впливу потенційного розвитку експлуатаційних дефектів у заданому середовищі та деградації властивостей металу труб. Оцінено умови руйнування тривало експлуатованої труби магістрального газопроводу “Київ–Західна Україна”.

Ключові слова: газопровід, корозійно-механічні тріщиноподібні дефекти, корозійно-втомні тріщини, наскрізні та критичних розмірів тріщини.

Газотранспортна мережа України становить 38,5 тис. км. Під час тривалої експлуатації одночасна дія на магістральні газопроводи статичних, циклічних та динамічних навантажень і корозивного середовища [1–4] спричиняє зародження та розвиток корозійно-механічних тріщиноподібних дефектів (виразок і борозенок) та корозійно-втомних тріщин, які, здебільшого, розташовані вздовж осі труби (рис. 1) [2, 5]. Згідно зі статистикою, під час періодичної діагностики тривало експлуатованих магістральних газопроводів виявляють близько 5000...6000 таких дефектів кожні 100 км довжини. Цим дефектам присвоюють певну категорію та приймають відповідні управлінські рішення [1, 6] щодо їх усунення.

Слід зауважити, що обґрунтовують роботоздатність тривало експлуатованих газопровідних систем за допомогою різних підходів до оцінки корозійно-механічної дефектності металу труб [3, 5, 7–11]. Проте чинні методики не враховують кінетику поширення таких дефектів, оскільки експлуатація магістральних газопроводів у реальному режимі характеризується певною періодичністю та несуттєвою, а в окремих випадках [12] значною, амплітудою зміни робочих тисків [2–4], що може спричинити аварійну ситуацію у результаті їх розвитку [2, 4, 5]. Тому, щоб визначити термін виконання ремонтних робіт для усунення дефектів і підвищення достовірності розрахункових оцінок залишкової довговічності дефектних газопроводів, необхідно враховувати субкритичний ріст корозійно-механічних тріщиноподібних дефектів, зумовлений втомую чи корозійною втомую матеріалу під час довготривалої дії експлуатаційних умов.

Оскільки 75% магістральних газопроводів України експлуатуються понад 30 років, то оцінювання виявлених під час технічного діагностування дефектів є актуальним.

Методика аналітично-числової оцінки кінетики та зміни форми корозійно-механічних тріщиноподібних дефектів під час їх розвитку в стінці трубопроводу. Запропонована методика [13] дає змогу прогнозувати особливості роз-

витку тріщиноподібних дефектів у реальних експлуатаційних умовах. В її основу покладено змодельований півеліптичною тріщиною з розмірами півосей c та a (рис. 1) корозійно-механічний тріщиноподібний дефект, розміщений на зовнішній стінці труби із зовнішнім діаметром D та товщиною стінки t .

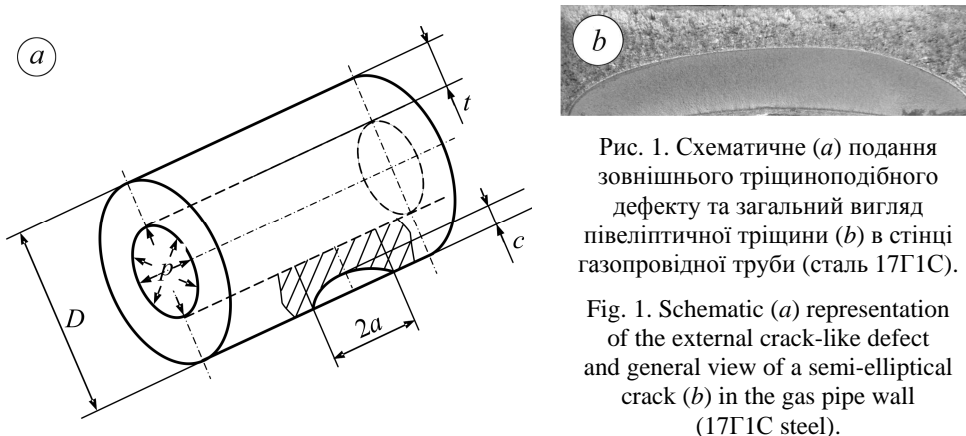


Рис. 1. Схематичне (а) подання зовнішнього тріщиноподібного дефекту та загальний вигляд півеліптичної тріщини (b) в стінці газопровідної труби (сталь 17Г1С).

Fig. 1. Schematic (a) representation of the external crack-like defect and general view of a semi-elliptical crack (b) in the gas pipe wall (17Г1С steel).

Уважається, що корозійно-механічний тріщиноподібний дефект розвивається за N циклів навантаження, зберігаючи півеліптичну форму. Однак співвідношення півосей c та a при цьому змінюється і залежить від системи “матеріал–середовище”, яка характеризується деякими сталими C_m , що можна виразити функцією

$$c/a = f(C_m, N). \quad (1)$$

Методика ґрунтується на таких положеннях механіки руйнування:

1. Розвиток тріщини розпочинається за досягнення у її вершині порогового значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) $K_I = K_{th}$.

2. Поширення тріщини (як в напрямку півосі c , так і в напрямку півосей a) повністю визначають діаграмою циклічної корозійної тріщиностійкості металу трубопроводу для заданої системи “матеріал–середовище”, яку аналітично описують за допомогою степеневі залежності Паріса [14]:

$$dc/dN = da/dN = C(\Delta K)^n, \quad (2)$$

де C та n – константи системи “матеріал–середовище”.

3. За досягнення $K_I = K_{fc}$ починається остаточне спонтанне руйнування труби.

Для обчислення КІН ΔK_I використовуємо залежність [5], яка дає змогу визначити його значення у довільній точці півеліптичної осьової тріщини, розміщеної в пустотілому циліндрі, що перебуває під дією внутрішнього тиску p .

Під час розрахунку кінетики розвитку корозійно-механічних тріщиноподібних дефектів (рис. 2) враховували такі умови. За основу вибрали розвиток тріщини в глибину стінки, тобто в напрямку півосі c . При цьому вважали, що пороговий розмір тріщини, тобто її початкова глибина, для всіх розглядуваних випадків c/a визначається умовою $c_0 = c_{th}$. Розраховували з припущенням, що тріщина розвивається стрибкоподібно з деяким сталим кроком $\Delta c_i = 0,25$ mm. Під час розрахунку діапазон зміни глибини тріщини становив: $c_0 \leq c \leq 0,8t$, де t – товщина стінки труби.

Послідовність розрахунку така.

1. Визначали у точці A_0 (рис. 2), тобто при $\theta = 0$, початкову глибину тріщини $c_0 = c_{th}$ з формули [5], підставляючи в неї експериментально визначене значення КІН ΔK_{th} .

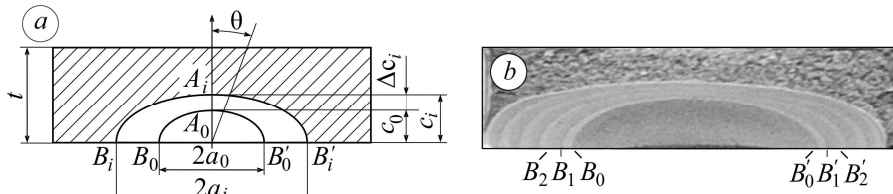


Рис. 2. Схема i -го приросту (а) та розвиток півеліптичної тріщини (б) в стінці газопровідної труби (сталь 17Г1С).

Fig. 2. Scheme of the i -th crack growth (a) and the growth of a semi-elliptical crack (b) in the gas pipe wall (17Г1С steel).

2. За значенням ΔK_{th} із формули (2) визначають очікувану швидкість росту тріщини в глибину стінки труби dc/dN .

3. За одержаним значенням dc/dN визначають кількість циклів навантаження dN_i , яка необхідна для приросту тріщини на $\Delta c_i = 0,25$ mm:

$$\frac{dc}{dN} = \frac{\Delta c_i}{\Delta N_i} \Rightarrow \Delta N_i = \frac{\Delta c_i}{dc/dN}. \quad (3)$$

4. Для тієї ж початкової глибини тріщини $c_0 = c_{th}$ за формулою (3) обчислюють КІН ΔK_I у точках B_0 та B'_0 (рис. 2), тобто при $\theta = \pi/2$.

5. За цим значенням ΔK_I з формули (2) визначали очікувану швидкість росту тріщини по довжині труби da/dN .

6. За одержаним значенням da/dN визначали приріст тріщини на Δa_i за кількість циклів навантаження ΔN_i (обчислена раніше):

$$\frac{da}{dN} = \frac{\Delta a_i}{\Delta N_i} \Rightarrow \Delta a_i = \Delta N_i \cdot \frac{da}{dN}. \quad (4)$$

7. За результатами, одержаними згідно з вищенаведеними пунктами, визначали нові розміри півеліптичної тріщини після її першого стрибкоподібного росту, тобто (рис. 2):

$$c_i = c_0 + \Delta c_i;$$

$$2a_i = 2a_0 + 2\Delta a_i.$$

Далі розглядали подальший приріст тріщини, тобто повторювали наведений вище розрахунок, приймаючи за початкові розміри тріщини c_i та $2a_i$. Обчислення закінчували з досягненням тріщиною глибини $c_n = 0,8t$.

Експериментально перевіряли запропоновану методику шляхом випробувань фрагмента труби ($D = 1020$ mm, $t = 14$ mm) експлуатованого за максимального робочого тиску газу $p \approx 5,4$ МПа упродовж 41 year магістрального газопроводу "Київ-Західна Україна", виготовленого зі сталі 17Г1С, яка мала такі механічні характеристики: $\sigma_U = 562,5$ МПа, $\sigma_{0,2} = 357,5$ МПа, $\delta = 27\%$. Досліджували зразки з наперед утвореними крайовою (рис. 3b) та півеліптичною (рис. 3c) тріщинами.

Заготовки для зразків (рис. 3a) довжиною $l = 300$ mm з поперечними розмірами 14×50 mm вирізали із фрагмента (котушки) труби. Досліджували за умов консольного згину зразків із частотою $f = 6,5$ Hz, синусоїдальної форми циклу навантаження з коефіцієнтом асиметрії $R = 0$, кімнатної температури ($T = 20^\circ\text{C}$). Середовище для випробувань – лабораторне повітря.

Результати випробувань зразків з крайовою тріщиною подані у вигляді діаграм циклічної тріщиностійкості (рис. 4 та табл. 1).

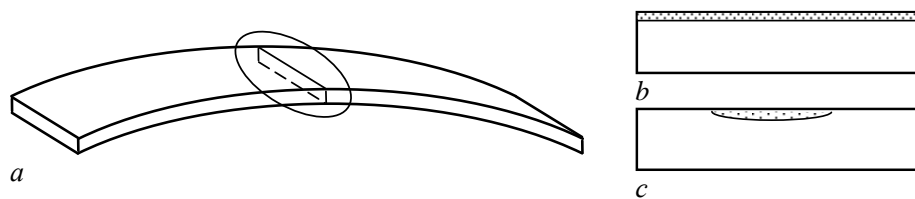


Рис. 3. Загальний вигляд зразка (а), вирізаного з фрагмента газопровідної труби з крайовою (b) і напівеліптичною (c) тріщиною.

Fig. 3. The general view of the sample cut from the fragment of the gas pipe with an edge (b) and a semi-elliptic (c) crack.

Таблиця 1. Значення констант у степеневій залежності (2) для сталі 17Г1С

Назва системи	$C, \frac{\text{mm/cycle}}{(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})^n}$	n	$\Delta K_{I_{th}}$	$\Delta K_{I_{fc}}$
			$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	
Експлуатований метал (ЕМ)–повітря (П)	$9,12 \cdot 10^{-13}$	3,62	8,59	41,87
ЕМ–NS4	$4,96 \cdot 10^{-14}$	5,14	10,93	37,12

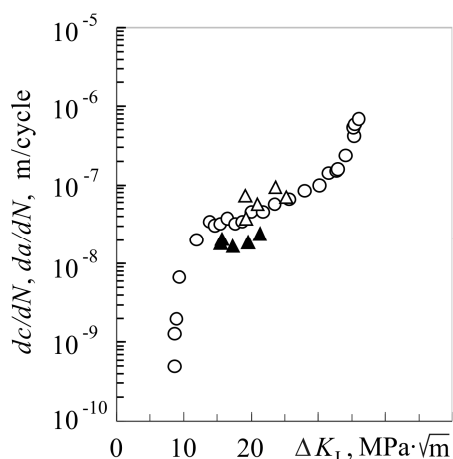


Рис. 4. Діаграма (O) циклічної тріщиностійкості сталі 17Г1С на повітрі при $R = 0$ та $f = 6,5$ Hz: Δ – результати на початкових стадіях; \blacktriangle – на завершальних.

Fig. 4. Curve (O) of fatigue crack growth resistance of 17Г1С steel in air at $R = 0$ and $f = 6.5$ Hz: Δ – results at initial stages; \blacktriangle – final stages.

Щоб одержати “відбиток” фронту півеліптичної тріщини, експериментували поетапно. На першому етапі початкове значення КІН циклу ΔK_I у точках B_0 та B'_0 (див. рис. 2) дорівнювало $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ і відповідало середньому значенню КІН середньоамплітудної ділянки Паріса (рис. 4).

Одержавши приріст тріщини $B_1 B_0 \approx B'_1 B'_0 \approx 1 \text{ mm}$ (світла смуга півеліпса на рис. 2b), КІН циклу ΔK_I зменшували на 30%, наближаючись до початку ділянки Паріса. Закінчувався перший етап приростом тріщини $B_2 B_1 \approx B'_2 B'_1 \approx 1,5 \text{ mm}$ (темна смуга півеліпса на рис. 2b). Після завершення першого етапу переходили до другого і так далі. У результаті одержали відбитки фронту поширення півеліптичної тріщини у стінці газопровідної труби (рис. 2b).

На рис. 4 світлими трикутниками відображено результати на початкових стадіях досліджуваних етапів, а темними – на завершальних. Їх аналіз показує, що результати на початкових стадіях знаходяться в межах розкиду середньоамплітудної ділянки Паріса, тобто практично збігаються. Тоді як експериментально одержані точки, що відповідають завершальним стадіям, розміщені дещо нижче цієї ділянки. Це можна пояснити специфікою експерименту – збільшеною у вершині тріщини пластичною зоною, подолання якої за умови зменшення на 30% КІН циклу ΔK_I у вершині тріщини призводить до певного сповільнення поширення тріщини.

Результати розрахунку кінетики розвитку тріщини, згідно з методикою [13] та експериментально встановленою траєкторією її розвитку, подано на рис. 5.

Кількість циклів навантаження до досягнення початку руйнування розрахована за формулою (3) – $N_0 = 1,52 \cdot 10^5$ cycle. Аналіз отриманих результатів засвідчує можливість застосування цієї методики для інтерпретації виявлених під час технічної діагностики тріщиноподібних дефектів.

Методика оцінювання умов руйнування експлуатованих газопроводів. Застосовуючи запропоновану методику для дефектної труби магістрального газопроводу “Київ–Західна Україна” за умови максимального тиску газу $p_{\max} = 5,4$ МПа, коефіцієнта асиметрії циклу навантаження $R = 0$ та моделі ґрунтової води (рН 6,7) – NS4 (0,483 NaHCO₃ g/l; 0,120 KCl; 0,137 CaCl₂; 0,131 MgCl₂·H₂O) [15], розрахували кінетику розвитку тріщиноподібних дефектів, визначили критичну кількість циклів навантаження та руйнівні розміри корозійно-втомної тріщини.

Під час розрахунків використовували результати випробувань зразків (див. рис. 3а), виготовлених зі сталі 17Г1С, на циклічну тріщиностійкість як на повітрі, так і в середовищі NS4 (див. табл. 1). Частота циклічного навантаження становила $f = 1,0$ Hz, температура середовища стала ($T = 20^\circ\text{C}$).

За результатами обчислень визначали руйнівні розміри напівеліптичної тріщини (c/a), що залежали від її початкової форми $(c/a)_0$ і умов експлуатації, та кількість циклів навантаження до руйнування (N^*) труби. Руйнівними ($2a^*$) вважали розміри, за яких виконувалась умова $p_{\max} = p_f = 5,4$ МПа.

Оцінювали цілісність труби з наскрізною тріщиною, порівнюючи її розмір $2a_t^*$ із обчисленим розміром наскрізної критичної тріщини $2a_c$, визначеної за критерієм тріщиностійкості [16, 17]:

$$a_c = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{K_{JC}}{F_1 \cdot \sigma_p} \right)^2, \quad (5)$$

де $F_1 = 1 + 0,072449 \cdot \lambda + 0,64856 \cdot \lambda^2 - 0,2327 \cdot \lambda^3 + 0,038154 \cdot \lambda^4 - 0,0023478 \cdot \lambda^5$; σ_p – максимальні розтягувальні напруження; $\sigma_p = p_{\max} \cdot R/t$; $\lambda = a_{K_1} / \sqrt{R \cdot t}$, a_{K_1} – півдовжина наскрізної тріщини.

Характеристики критичної тріщиностійкості (табл. 2) подали критичним КІН K_{JC} , який визначили за допомогою рівняння [1]

$$K_{JC} = \sqrt{\frac{J_C \cdot E}{1 - \mu^2}}, \quad (6)$$

де J_C – критична тріщиностійкість; E – модуль Юнга ($E = 10^{11}$ Па); μ – коефіцієнт Пуассона (для низьколегованих сталей $\mu = 0,3$).

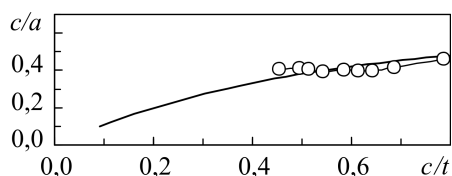


Рис. 5. Зміна форми тріщини (c/a) під час її розвитку в глибину (c/t) стінки експлуатованої газопровідної труби (сталь 17Г1С) під час випробування на повітрі: суцільна лінія – розрахунок; точки – експеримент.

Fig. 5. Change of the crack shape (c/a) during its growth into depth (c/t) of the wall of operated gas pipe (17G1C steel) during testing in air: solid line – calculation; points – an experiment.

Таблиця 2. Наскрізні $2a_t^*$ та критичні $2a_c$ розміри корозійно-втомних тріщин для труби газопроводу

Система “сталь 17Г1С– середовище”	c_{th} / a_0	N^* , cycle	$2a^*$	$2a_t^*$	K_{Jc} , MPa \sqrt{m}	$2a_c$, mm
			mm			
ЕМ–П	1 / 10	$5,68 \cdot 10^5$	66,5	73,3	232,8	248,6
ЕМ–NS4	1 / 10	$2,24 \cdot 10^4$	73,4	81,2	201,8	220,0
ЕМ–П	1 / 40	$4,43 \cdot 10^5$	197,9	214,8	232,8	248,6
ЕМ–NS4	1 / 40	$1,96 \cdot 10^4$	219,9	237,7	201,8	220,0

Аналіз результатів (табл. 2) дає підстави зробити висновок, що в повітрі відсутні умови для катастрофічного руйнування тривало експлуатованої дефектної газопровідної труби ($c_{th} / a_0 \leq 1/40$), а можливе лише утворення “свища”, оскільки виконується умова $2a_t^* < 2a_c$. У ґрунтовій воді (NS4) виконується умова $2a_c < 2a_t^*$, а отже, існує потенційна можливість катастрофічного руйнування труби.

ВИСНОВКИ

Експериментально підтверджено на прикладі тривало експлуатованої труби магістрального газопроводу “Київ–Західна Україна”, що методика аналітично-числової оцінки кінетики та зміни форми корозійно-механічних тріщиноподібних дефектів під час їх розвитку в стінці газопровідної труби дає змогу прогнозувати особливості їх поширення в експлуатаційних умовах. З використанням підходів механіки руйнування для тривало експлуатованих газопроводів запропоновано методику оцінювання критичних розмірів наскрізних корозійно-втомних тріщиноподібних дефектів. Встановлено умови, за яких можливе катастрофічне руйнування газопровідної труби. Запропонований підхід дає змогу оцінити виявлені під час технічного діагностування дефекти.

РЕЗЮМЕ. Экспериментально подтверждена эффективность аналитически-численной методики оценки кинетики и изменения формы коррозионно-механических трещиноподобных дефектов в процессе их развития в стенке трубопровода. Предложено расчетно-экспериментальную методику оценивания условий разрушения газопроводов длительной эксплуатации с учетом влияния потенциального развития эксплуатационных дефектов в заданной среде и деградации свойств металла труб. Оценены условия разрушения длительно эксплуатируемой трубы магистрального газопровода “Киев–Западная Украина”.

SUMMARY The effectiveness of the analytical-numerical method for evaluation of the kinetics and change of the shape of corrosive-mechanical crack-like defects in the process of their growth in the pipeline wall is proved experimentally. The analytical-experimental method for estimation of fracture conditions of long-operation gas pipeline with account of the influence of potential development of service defects in the given environment and degradation properties of pipe metal is proposed. The conditions under which the catastrophic fracture of the long operation main gas pipeline “Kyiv–Western Ukraine” is possible, is determined.

1. *Корозійно-воднева* деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук.-техн. посіб. у 3-х т. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Т. 3: Деградація газопроводів та її запобігання / Є. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин. – Івано-Франківськ–Львів: Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2012. – 434 с.
2. *Борисенко В. А., Нихаенко Ю. П., Крикун В. И.* Коррозионное разрушение газопроводов // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – Спец. вип. № 5. – С. 296–299.
3. *Крижанівський С. І., Тарасівський О. С., Тарасівський С. Й.* Вплив середовища та нерівномірності споживання газу на безаварійну експлуатацію газопроводу // Там же. – 2008. – Спец. вип. № 7. – С. 791–796.

4. Красовський А. Я., Ориняк І. В., Лохман І. В. Оцінка залишкового ресурсу трубопроводу, ушкодженого стрес-корозією // Трубопровідний транспорт. – 2011. – № 2 (68). – С. 18–21.
5. Дмитрах І. М., Панасюк В. В. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 1999. – 342 с.
6. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук.-техн. посіб. у 3-х т. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Т.1: Основи оцінювання деградації трубопроводів / Є. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин. – Івано-Франківськ–Львів: Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2011. – 458 с.
7. Деградація властивостей сталей магістральних газопроводів упродовж їх сорокарічної експлуатації / Г. М. Никифорчин, О. Т. Цирульник, Д. Ю. Петрина та ін. // Проблеми міцності. – 2009. – № 5. – С. 66–72.
8. Поляков С. Г., Рибаків А. О. Основні закономірності стрес-корозійного розтріскування магістральних газопроводів // Там же. – 2009. – № 5. – С. 7–17.
9. Крижанівський Є. І., Никифорчин Г. М. Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 2. – С. 11–20.
(Kryzhaniv's'kyi E. I. and Nykyforchyn H. M. Specific features of hydrogen-induced corrosion degradation of steels of gas and oil pipelines and oil storage reservoirs // Materials Science. – 2011. – 47, № 2. – P. 127–136.)
10. Effect of the long-term service of the gas pipeline on the properties of the ferrite-pearlite steel / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyurulnyk et al. // Mater. and Corr. – 2009. – 60, № 9. – P. 716–725.
11. Environmentally assisted “in-bulk” steel degradation of long term service gas trunkline / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyurulnyk et al. // Eng. Failure Analysis. – 2010. – 17. – P. 624–632.
12. Крижанівський Є. І., Тараєвський О. С. Дослідження корозійно-втомних характеристик сталі 17Г1С магістрального газопроводу // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – Спец. вип. № 5. – С. 290–295.
13. Грабовський Р. С., Лужецький В. С., Горб'як Т. М. До оцінки кінетики росту втомних тріщин в стінках трубопроводів // Машинознавство. – 2005. – № 4 (94). – С. 7–10.
14. Парис П. Эрдоган Ф. Критический анализ законов распространения трещин // Техническая механика. – 1963. – Сер. Е, № 4. – С. 60–66.
15. Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement / J. Caprille, J. Gilgert, I. Dmytrakh et al. // Int. J. Hydrogen Energy. – 2008. – 33, № 24. – P. 7630–7641.
16. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Т. 13: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / І. М. Дмитрах, Л. Тот, О. Л. Білий, А. М. Сиротюк. – Львів: Сполум, 2012. – 316 с.
17. Грабовський Р. С., Лужецький В. С. До оцінки катастрофічного руйнування трубопроводу з тріщиноподібними дефектами // Наукові нотатки: міжвуз. зб. – Луцьк: Луцьк. держ. техн. ун-т, 2006. – Вип. 19. – С. 56–63.

Одержано 11.11.2014