

УДК: 539.375;539.4

КОМПЛЕКСНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЕЛЕМЕНТА КОНСТРУКЦІЇ ЗА ДІЇ ТРИВАЛОГО СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ, КОРОЗІЇ І ДЕГРАДАЦІЇ МАТЕРІАЛУ

О. Є. АНДРЕЙКІВ¹, І. Я. ДОЛІНСЬКА^{2,3}, М. О. ЛЮБЧАК²

¹ Львівський національний університет ім. Івана Франка;

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

³ Бідгоцька Політехніка, Польща

Побудовано комплексний метод застосування акустичної емісії (АЕ) та енергетичного підходу для визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій за дії тривалого статичного навантаження, корозивного середовища і експлуатаційної деградації матеріалів. В основу покладено перший закон термодинаміки для балансу енергетичних складників і роботи зовнішніх сил, а також баланс швидкостей їх зміни для елементарного стрибка просування тріщини. Прийнято гіпотезу лінійної залежності розміру площі активної тріщини від кількості виділених при цьому імпульсів АЕ. Зміну в часі параметрів експлуатаційної деградації матеріалу математично змодельовано лінійними залежностями. Задачу про визначення залишкового ресурсу тонкостінного елемента конструкції розв'язано за допомогою енергетичного підходу і зведено до диференціального рівняння з початковою і кінцевою умовами. В отриманій математичній задачі невідомі два параметри – розмір початкової плоскої тріщини і навантаженість матеріалу біля неї, які визначено так. Приладом АЕ впродовж заданого часу (150 h) зафіксовано кількість імпульсів АЕ і швидкість їх рахунку, які підставлено у формули для визначення площі початкової тріщини і параметра навантаженості матеріалу в її околі. Для демонстрації застосування цього методу виконано числовий експеримент і розраховано залишковий ресурс пластини зі сталі Х70.

Ключові слова: корозійно-механічна тріщина, акустична емісія, експлуатаційна деградація матеріалу, залишковий ресурс, енергетичний підхід.

A comprehensive method of applying acoustic emission (AE) and the previously developed energy approach to determine the residual lifetime of thin-walled structural elements under conditions of long-term static load, corrosive environment effect and operational degradation of materials is developed. The method is based on the first law of thermodynamics of the balance of energy components and the work of external forces, as well as their rates of change for an elementary jump of crack propagation. The hypothesis of a linear relationship between the size of the area of the active crack and the number of acoustic emission pulses released at the same time is assumed. The change in the characteristics of the oil and gas pipeline material during its operational degradation is mathematically modeled by a linear dependence on time. The above-formulated problem of determining the residual lifetime of a thin-walled structural element was solved using the energy approach and reduced to a differential equation with initial and final conditions. In the mathematical problem obtained in this way, two parameters are unknown: the size of the initial plane crack and the loading parameter of the material near it. These parameters were determined as follows. With the help of the AE device, during the given time (150 hours), the number of AE pulses and the rate of their counting were recorded. These values were introduced into the established

Контактна особа: І. Я. ДОЛІНСЬКА, e-mail: ira_dolinska@ukr.net

formulas for determining, the area of the initial crack and the parameter of loading of the material in its vicinity. To demonstrate the application of this complex method, a numerical experiment was performed and the residual life of a X70 steel plate was determined.

Keywords: *corrosion-mechanical crack, acoustic emission, operational degradation of material, residual lifetime, energy approach.*

Вступ. Сьогодні для інженерної практики важливо розробити надійні методи прогнозування довготривалої міцності і ресурсу (залишкового ресурсу) несучих вузлів машин і конструкцій довготривалої експлуатації в умовах дії агресивних середовищ та інших фізико-хімічних чинників. Найнебезпечніший тут одночасний вплив корозивного середовища, механічного навантаження та деградації матеріалів на міцність і довговічність металевих елементів конструкцій [1, 2] під час експлуатації відповідального обладнання в різних галузях промисловості [3].

Внаслідок сумісної дії цих чинників в об'єкті може зародитися і розвиватися тріщина [4–6]. Тому для безпечного експлуатування слід оцінити його залишковий ресурс. Для розв'язання таких задач застосовують розрахункові моделі, які описують локальне руйнування об'єкта – поширення тріщини з можливістю оцінки її докритичного росту [7, 8]. Щоб їх застосувати на практиці, необхідно мати інформацію про локацію і геометрію тріщини, а також рівень навантаження. Найчастіше візуально контролювати появу і розвиток тріщин неможливо через їх тунелювання всередині матеріалу та ускладнення доступу до об'єкта контролю, особливо під час деградації матеріалу в реальних умовах експлуатації. Тут ефективний метод акустичної емісії (АЕ) [2, 9–16], який вигідно відрізняється від інших методів неруйнівного контролю можливістю дистанційного моніторингу всього об'єму матеріалу [17, 18] і високою чутливістю.

Нижче розроблено комплексний метод визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій довготривалої експлуатації за дії статичного навантаження, водневого і корозивного середовищ в умовах експлуатаційної деградації їх матеріалів, який об'єднує адаптовані один до одного метод АЕ та енергетичний підхід. Розмір тріщини і навантаження в її околі запропоновано визначати за акустограмою, знятою з елемента конструкції під час поширення тріщини. Метод застосовано до оцінювання впливу експлуатаційної деградації на залишковий ресурс відповідальних елементів конструкцій. Його суть ось у чому.

Формулювання моделі. Як тонкостінний об'єкт розглянемо пластину завтовшки h , піддану довготривалому статичному розтягу невідомими зусиллями p , впливу корозивного середовища і деградації її матеріалу в експлуатаційних умовах. Пластина послаблена наскрізною плоскою прямолінійною тріщиною невідомої початкової площі S_0 , в яку проникає корозивне середовище, що сприяє її корозійно-механічному поширенню. Вважаємо, що тріщина розповсюджується за механізмом нормального відриву, а матеріал деградує з часом незалежно від її руху. Приймаємо, що за розтягу пластини напружено-деформований стан є симетричним відносно площини розміщення тріщини і характеризується коефіцієнтом інтенсивності напружень (КІН) K_I . Необхідно оцінити залишковий ресурс пластини t_* – час, за який тріщина досягне критичного розміру.

Задачу розв'язуємо за розробленим раніше енергетичним підходом [19] і зводимо її до математичної моделі:

$$\frac{dS}{dt} = \alpha_1(t_1)h \frac{\delta_t - \delta_{sc}(t_1)}{\delta_{CC}(t_1) - \delta_t}, \quad (1)$$

$$t = 0, \quad S(0) = S_0, \quad t = t_*, \quad S(t_*) = S_*, \quad \delta_t(S_*) = \delta_C.$$

Тут S , S_0 – біжуча і невідома початкова площі тріщини; t – час її росту; t_1 – змінний час деградації матеріалу пластини; S_* – критична площа тріщини; δ_t – роз-

криття тріщини вздовж її контуру; $\delta_{CC}(t_1)$ і $\delta_{scc}(t_1)$ – критичне і мінімальне значення δ_i ; $\alpha_1(t_1)$ – швидкість поширення корозійно-механічної тріщини, яку знаходять експериментально. Характеристики $\alpha_1(t_1)$, $\delta_{CC}(t_1)$, $\delta_{scc}(t_1)$ змінюються в часі внаслідок експлуатаційної деградації.

Якщо тріщина макроскопічна, тобто виконуються співвідношення $\delta_i = K_I^2(\sigma_i E)^{-1}$, $\delta_{scc} = K_{scc}^2(\sigma_i E)^{-1}$, $\delta_{CC} = K_{IC}^2(\sigma_i E)^{-1}$, розрахункова модель (1) набуде вигляду

$$\frac{dS}{dt} = \alpha_1(t_1)h \cdot \frac{K_I^2(S) - K_{scc}^2(t_1)}{K_{IC}^2(t_1) - K_I^2(S)}, \quad (2)$$

$$t = 0, \quad S(0) = S_0, \quad t = t_*, \quad S(t_*) = S_*, \quad K_I(S_*) = K_{IC}. \quad (3)$$

Тут K_{scc} , K_{IC} – нижнє і верхнє порогові значення КІН на кінетичній діаграмі корозійно-механічного руйнування; σ_i – усереднені напруження в зоні передруйнування; E – модуль пружності.

Для оцінки залишкового ресурсу елемента конструкції за моделлю (2), (3) необхідно знати параметр S_0 і навантаження пластини p . Їх намагатимемося знайти методом АЕ, зокрема, використовуючи акустограму, записану на елементі досліджуваної конструкції (пластині). Раніше [20, 21] в теоретичних основах АЕ для діагностування заповільненого руйнування матеріалів і елементів конструкцій застосовували лінійну залежність площі дефекту від імпульсів АЕ під час його утворення, яку підтверджують результати досліджень росту корозійних тріщин [12, 22, 23]. У працях [12, 22, 23] спостерігали майже пропорційну залежність площі тріщини від накопичення імпульсів АЕ. Надалі вважаємо, що

$$S \approx n/k, \quad (4)$$

де n – кількість імпульсів АЕ, зареєстрованих під час росту тріщини; k – коефіцієнт пропорційності.

Рівняння (2) перепишемо так:

$$\frac{dn}{dt} = \alpha_1(t_1)hk \cdot \frac{K_I^2(n) - K_{scc}^2(t_1)}{K_{IC}^2(t_1) - K_I^2(n)}. \quad (5)$$

Для наскрізної тріщини в пластині КІН з урахуванням рівності (4) набуде вигляду [24]

$$K_I = p\sqrt{\pi l} = p\sqrt{\pi h^{-1}S} = p\sqrt{\pi h^{-1}k^{-1}n}, \quad (6)$$

де l – довжина тріщини.

Підставивши вираз (6) в (5), отримаємо:

$$\frac{dn}{dt} = \alpha_1(t_1)hk \cdot \frac{p^2\pi h^{-1}k^{-1}n - K_{scc}^2(t_1)}{K_{IC}^2(t_1) - p^2\pi h^{-1}k^{-1}n}. \quad (7)$$

Щоб за рівнянням (7) оцінити довговічність елементів конструкцій, потрібно знати параметри $\alpha_1(t_1)$, $K_{scc}(t_1)$, $K_{IC}(t_1)$, які характеризують експлуатаційну деградацію матеріалу. Вони змінюються в часі і для розрахунків тут їх потрібно задати як функції. Аналізуючи результати досліджень деградації сталі X70 [25–28] у стані постачання і після 33 років експлуатації, встановили, що характеристики матеріалу впродовж цього часу змінюються незначно і майже лінійно. Тому їх зміну подамо лінійною залежністю від часу, тобто

$$\alpha_1(t_1) = \beta_0 + \beta_1 t_1, \quad K_{IC}(t_1) = \gamma_0 + \gamma_1 t_1, \quad K_{scc}(t_1) = \phi_0 + \phi_1 t_1. \quad (8)$$

Тут β_i , γ_i , ϕ_i ($i = 0;1$) – коефіцієнти, які знаходимо з експериментів. Підставивши залежності (8) в (7), отримаємо рівняння

$$\frac{dn}{dt} = hk(\beta_0 + \beta_1 t_1) \frac{p^2 \pi h^{-1} k^{-1} n - (\varphi_0 + \varphi_1 t_1)^2}{(\gamma_0 + \gamma_1 t_1)^2 - p^2 \pi h^{-1} k^{-1} n}, \quad (9)$$

яке описує еталонну аналітичну акустограму під час поширення корозійно-механічної тріщини в тонкостінному елементі конструкції з прямолінійною плоскою тріщиною нормального відриву і пов'язує час її підростання, кількість імпульсів АЕ і рівень навантаження елемента.

Водночас, інтегруючи рівняння (2) з урахуванням співвідношень (4), (6) і (8), дістанемо наближене співвідношення для визначення часу підростання тріщини:

$$t \approx h^{-1} (\beta_0 + \beta_1 t_1)^{-1} \left[(b-a) \cdot \ln \frac{S_0 + nk^{-1} - a}{S_0 - a} - nk^{-1} \right], \quad (10)$$

$$a = \frac{(\varphi_0 + \varphi_1 t_1)^2}{\pi p^2 h^{-1}}, \quad b = \frac{(\gamma_0 + \gamma_1 t_1)^2}{\pi p^2 h^{-1}}.$$

Для обчислення параметрів p і S_0 чинимо так. За певний проміжок часу $t = t_{\text{exp}}$ розшифруємо акустограму, зняту безпосередньо з об'єкта контролю, і знаходимо кількість імпульсів n_{exp} і швидкість їх рахунку $dn/dt = \dot{n}_{\text{exp}}$. Підставляємо ці значення у співвідношення (9), (10) і отримуємо:

$$p \approx \sqrt{\frac{\dot{n}_{\text{exp}} (\gamma_0 + \gamma_1 t_{\text{exp}})^2 + hk(\beta_0 + \beta_1 t_{\text{exp}})(\varphi_0 + \varphi_1 t_{\text{exp}})^2}{\dot{n}_{\text{exp}} \pi h^{-1} k^{-1} n_{\text{exp}} - \pi n_{\text{exp}} (\beta_0 + \beta_1 t_{\text{exp}})}}, \quad (11)$$

$$S_0 \approx \frac{n_{\text{exp}} k^{-1}}{\exp\left(\frac{t_{\text{exp}} (\beta_0 + \beta_1 t_{\text{exp}}) + n_{\text{exp}} k^{-1}}{b-a}\right) - 1} + a.$$

Тут t_{exp} – час фіксації акустичних сигналів.

Отже, маємо два рівняння (11), з розв'язку яких можемо визначити величини S_0 і p . Підставляємо їх у математичну задачу (2), (3), яка набуває вигляду

$$\frac{dS}{dt} = h(\beta_0 + \beta_1 t_1) \frac{p^2 \pi h^{-1} S - (\varphi_0 + \varphi_1 t_1)^2}{(\gamma_0 + \gamma_1 t_1)^2 - p^2 \pi h^{-1} S}, \quad (12)$$

$$t = 0, \quad S(0) = S_0, \quad t = t_*, \quad S(t_*) = S_*, \quad K_I(S_*) = K_{IC}.$$

Задачу (12) розв'язуємо наближено методом розділення змінних. Для $t_1 = t_*$ отримаємо:

$$t_* \approx h^{-1} (\beta_0 + \beta_1 t_*)^{-1} \left[S_0 - S_* + (b_* - a_*) \ln \frac{S_* - a_*}{S_0 - a_*} \right], \quad (13)$$

$$a_* = \frac{(\varphi_0 + \varphi_1 t_*)^2}{\pi p^2 h^{-1}}, \quad b_* = \frac{(\gamma_0 + \gamma_1 t_*)^2}{\pi p^2 h^{-1}}.$$

Величину t_* з алгебричного рівняння (13) визначаємо числово за відомих параметрів $\beta_i, \gamma_i, \varphi_i$ ($i = 0; 1$), одержаних з експерименту.

Числовий експеримент. Для демонстрації застосування комплексного методу до визначення залишкового ресурсу пластини зі сталі X70 товщиною $h = 0,01$ м за дії довготривалого статичного навантаження, корозивного середовища і деградації її матеріалу чинимо так. За результатами праць [25–28] і рівнянням (2) знаходимо характеристики корозійної тріщиноустійкості сталі у вихідному стані ($t_1 = 0$) і після 33 років експлуатації ($t_1 = 33$): $K_{IC}(0) = 149 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; $K_{IC}(33) = 85 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; $K_{scc}(0) = 7,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; $K_{scc}(33) = 6,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; $\alpha_1(0) =$

= 0,1163 m/year; $\alpha_1(33) = 0,4651$ m/year. Враховуючи їх, зміну параметрів деградації (8) сталі після 33 років експлуатації запишемо у вигляді лінійних залежностей:

$$\begin{aligned}\alpha_1(t_1) &= 0,465 + 0,011t_1 \text{ (m/year),} \\ K_{IC}(t_1) &= 85 - 1,939t_1 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}), \\ K_{SCC}(t_1) &= 6,2 - 0,039t_1 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}).\end{aligned}\tag{14}$$

Для числових розрахунків приймаємо такі параметри АЕ [2, 17, 18]:

$$n_{\text{exp}} = 2400 \text{ imp; } t_{\text{exp}} = 150 \text{ h; } k = 2,06 \cdot 10^6 \text{ imp/m}^2.\tag{15}$$

Підставляючи вирази (14) і (15) у формулу (11), дістанемо:

$$p = 150 \text{ МПа; } S_0 \approx 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.\tag{16}$$

Підставляючи вирази (16) і (14) у рівняння (13), визначимо наближено залишковий ресурс пластини $t_* = 1,2$ роки.

ВИСНОВКИ

Розроблено комплексний метод визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій довготривалої експлуатації за дії статичного навантаження, корозивно-наводнювальних середовищ та експлуатаційної деградації їх матеріалів, який об'єднує адаптовані один до одного метод акустичної емісії та енергетичний підхід. Розмір тріщини і параметр навантаження в її околі визначено за параметрами акустограми, знятої з елемента конструкції під час поширення тріщини. Метод застосовано до оцінювання залишкового ресурсу пластини зі сталі Х70 після 33 років експлуатації з урахуванням деградації матеріалу.

1. Панасюк В. В., Дмитрах І. М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень. – Львів: Фіз.-мех. ін-т, 1999. – 340 с.
2. Назарчук З. Т., Скальський В. Р., Селівончик Т. В. Акустико-емісійне діагностування корозійно-водневого розтріскування конструкційних сталей. – К.: Наук. думка, 2019. – 256 с.
3. Петрина Д. Ю., Петрина Л. Г. Вплив корозійного середовища на сучасні сталі магістральних трубопроводів // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2022. – № 2(83). – С. 95–104. DOI: 10.31471/1993-9973-2022-2(83)-95-104
4. Stress corrosion cracking of high-strength Ni-based alloys in pressurized water reactor primary water containing KOH vs. LiOH / Ziqing Zhai, Ferdinan Cintron-Colon, Ryan A. Bouffieux, Mychailo B. Toloczko // Corrosion. – 2024. – **80**, № 4. – P. 349–363. <https://doi.org/10.5006/4460>.
5. Insights into the stress corrosion cracking propagation behavior of Alloy 690 and 316 L stainless steel in KOH versus LiOH oxygenated water / Jiamei Wang, Tianyu Zhu, Yichen Bao, Xiaoqiang Liu, Xiuqiang Shi, Xianglong Guo, Zhongli Han, Peter L. Andresen, Lefu Zhang, Kai Chen // Corr. Sci. – 2023. – **224**. – Article number 111556. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111556>
6. Evaluation of the stress corrosion crack growth behaviour of high-strength marine steel based on model of crack tip mechano-electrochemical effect / Yong Li, Tao Hu, Qian Li, Yang Wu, Ling Wang, Yang You, Biyun Wang // J. of Mater. Sci. & Technol. – 2024. – **190**. – P. 93–105.
7. Tian Su, Yuhui Huang, and Fu-Zhen Xuan. Stress corrosion cracking growth rate prediction model for nuclear power turbine rotor steel in a simulated environment // J. of Mater. Res. and Technol. – 2023. – **23**. – P. 830–844. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.049>
8. Evaluation of the residual life time of the ethylene production rectification column under wind load and atmospheric corrosion / O. Ye. Andreikiv, I. Ya. Dolinska, N. S. Zviahin and K. R. Bobryk // Materials Science. – 2023. – **58**, № 4. – P. 437–445. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00682-6>.
9. Nazarchuk Z., Skalskyi V., and Serhiyenko O. Acoustic emission. Methodology and Application. – Cham: Springer Int. Publ. AG, 2017. – 284 p.
10. Andreikiv O. E., Skalskyi V. R., and Serhienko O.M. Acoustic-emission criteria for rapid analysis of internal defects in composite materials // Materials Science. – 2001. – **37**, № 1. – P. 106–117. DOI: 10.1023/A:1012346624802

11. *Ziehl P. and ElBatanouny M.* 10-Acoustic emission monitoring for corrosion damage detection and classification // *Corr. of Steel in Concrete Struct.* – 2016. – P. 193–209. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-381-2.00010-9>
12. *Acoustic emission monitoring of stress corrosion cracking / W. W. Gerberich, R. H. Jones, M. A. Friesel, and A. Nozue // Mater. Sci. and Eng.* – 1988. – **A103**. – P. 185–191. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(88\)90565-4](https://doi.org/10.1016/0025-5416(88)90565-4)
13. *Jomdechaa C., Prateepasena A., and Kaewtrakulpong P.* Study on source location using an acoustic emission system for various corrosion types // *NDT & E Int.* – 2007. – **40**. – P. 584–593. DOI: 10.1016/j.ndteint.2007.05.003
14. *Alvarez M. G., Lapitz P., and Ruzzante J.* Analysis of acoustic emission signals generated from SCC propagation // *Corr. Sci.* – 2012. – **55**. – P. 5–9. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.08.014>
15. *Calabrese L. and Proverbio E.* A Review on the applications of acoustic emission technique in the study of stress corrosion cracking // *Corr. Mater. Degrad.* – 2021. – **2**, Is. 1. – P. 1–30. <https://doi.org/10.3390/cmd2010001>
16. *Estimation of characteristics of nanocrystalline layer using the surface acoustic waves / V. R. Skalskyi, O. M. Mokryi, O. I. Zvirko, V. I. Kyryliv, I. M. Romanyshyn, and O. V. Maksymiv // Materials Science.* – 2023. – **59**, № 2. – P. 180–185. DOI: 10.1007/s11003-024-00760-3
17. *Назарчук З. Т., Скальський З. Т.* Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. пос. у 3-х т. – Т. 3: Засоби та застосування методу акустичної емісії. – К.: Наук. думка, 2009. – 328 с.
18. *Скальський В. Р., Коваль П. М.* Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Методологічні аспекти відбору та обробки інформації. – Львів: Сполом, 2005. – 396 с.
19. *Determination of the residual service life of a torsion bar under the influence of corrosive media / O. E. Andreikiv, I. Ya. Dolinska, S. V. Nastasiak, and M. S. Shefer // Materials Science.* – 2022. – **57**, № 5. – P. 633–639. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00589-8>
20. *Andreikiv O. Y., Skalskyi V. R., and Dolinska I. Y.* Theoretical foundations of the method of acoustic emission for the diagnostics of delayed fracture of materials // *Materials Science.* – 2021. – **57**, № 3. – P. 355–365. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00550-1>
21. *Skalskyi V., Andreikiv O., and Dolinska I.* Assessment of subcritical crack growth in hydrogen-containing environment by the parameters of acoustic emission signals // *Int. J. of Hydrogen Energy.* – 2018. – **43**. – P. 5217–5224. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.124>
22. *Quantitatively related acoustic emission signal with stress corrosion crack growth rate of sensitized 304 stainless steel in high-temperature water / Zhen Zhang, Ziyu Zhang, Jibo Tan, Xinqiang Wu // Corr. Sci.* – 2019. – **157**. – P. 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.05.030>
23. *Evaluation of stress corrosion cracking phenomenon in an AISI type 316LN stainless steel using acoustic emission technique / H. Shaikh, R. Amirthalingam, T. Anita, N. Sivaibharasi, T. Jaykumar, P. Manohar, and H. S. Khatak // Corr. Sci.* – 2007. – **49**. – P. 740–765. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.06.007>
24. *Саврук М. П.* Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. – К.: Наук. думка, 1988. – 620 с.
25. *Nykyforchyn H. M. and Tsyryl'nyk O. T.* Specific features of the in-service bulk degradation of structural steels under the action of corrosive media // *Strength of Mater.* – 2009. – **41**, № 6. – P. 651–663. <https://doi.org/10.1007/s11223-009-9167-7>
26. *Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. пос. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів / Г. М. Никифорчин, С. Г. Поляков, І. В. Ориняк, З. В. Слободян, Р. М. Джала. Під ред. Г. М. Никифорчина. – Львів: Сполом, 2009. – 504 с.*
27. *Електрохімічні показники експлуатаційної деградації сталей нафто- та газогонів / О. Цирульник, З. Слободян, М. Греділь, О. Звірко, Д. Завербний // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2006. – Спец. вип. № 5. – С. 284–289.
28. *Крижанівський С. І., Никифорчин Г. М.* Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: Наук.-техн. пос. у 3-х т. / За ред. В. В. Панасюка. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – Т. 1. – 2010. – 457 с.; Т. 2. – 2011. – 448 с.; Т. 3. – 2012. – 432 с.

Одержано 27.03.2024