

УДК 620.19

ВПЛИВ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ НА РІСТ КОРОЗІЙНОЇ ТРІЩИНИ У СТІНЦІ ТРУБОПРОВОДУ

В. М. ЮЗЕВИЧ, В. П. ЛОЗОВАН

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

Запропоновано методику оцінювання закономірностей кінетики росту зовнішньої корозійної тріщини у стінці підземного металевого трубопроводу (ПМТ) з урахуванням заданого внутрішнього тиску і катодного захисту. В її основі аналіз корозійного струму у вершині тріщини з урахуванням механічних напружень, омичного зниження потенціалу, перенапруження анодного розчинення металу. Запропоновано удосконалений метод обчислення ресурсу ПМТ з урахуванням впливу механічних напружень в околі вершини тріщини на корозійні струми. Виявлено, що механічні напруження призводять до зменшення ресурсу трубопроводу у 3,6 рази порівняно з режимом, коли внутрішній тиск близький до атмосферного.

Ключові слова: *підземний трубопровід, тріщина, механічні напруження, корозійні струми, катодний захист, критерій якості, нейронні мережі.*

The method of estimation of the peculiarities of the kinetics of an external corrosion crack growth in the wall of an underground metal pipeline (UMP) taking into account the specified internal pressure and cathodic protection is proposed. The corresponding method is based on the analysis of the corrosion current at the crack tip, taking into account mechanical stresses, ohmic potential drop, overvoltage of anodic dissolution of metal. An improved method for calculating the service life of UMP taking into account the influence of mechanical stresses in the vicinity of the crack tip on corrosion currents is proposed. It is found that mechanical stresses lead to a 3.6-fold decrease in the pipeline life compared to the regime when the internal pressure is close to the atmospheric.

Keywords: *underground pipeline, crack, mechanical stresses, corrosion currents, cathodic protection, quality criterion, neural networks.*

Вступ. Аналіз і моніторинг параметрів технічного стану підземних металевих трубопроводів (ПМТ) важливі та актуальні, оскільки пошкодження та руйнування елементів конструкцій під час експлуатації може призвести до небезпечних і/або катастрофічних наслідків. Під час комплексного аналізу поточного стану ПМТ доцільно враховувати експлуатаційні навантаження і параметри катодного захисту (КЗ), які характеризують їх взаємодію з навколишнім агресивним середовищем.

Складні системи такого типу з великим обсягом пошкоджень доцільно аналізувати за допомогою нейронних мереж. Принцип їх використання полягає в неперервному та автоматичному контролі дефектів і пошкоджень, які обумовлені несприятливими умовами під час експлуатації.

Актуальність досліджень системи ПМТ пов'язана зі завданнями неруйнівного дистанційного контролю, електрохімічного захисту від корозії і подовження ресурсу.

Аналіз літературних даних. Для відбору інформації про корозійне деформування підземного трубопроводу застосовуємо підходи механіки руйнування конструкційних матеріалів, електрохімії і кваліметрії [1–7].

Контактна особа: В. П. ЛОЗОВАН, e-mail: vitalulozovan@gmail.com

Взаємозв'язок між полем механічних напружень та електродними потенціалами і струмами для металевих тіл з дефектами подано раніше [1, 3–8]. Але залишилися нерозв'язані питання, пов'язані з особливостями впливу (механізмами) катодного захисту і механічних напружень в околі вершини дефекту на корозійні струми. Також недостатньо уваги приділено неруйнівним методам контролю. Зокрема, не розроблено методика використання інформації, отриманої в результаті застосування методу безконтактних вимірювань струму (БВС), для оцінювання ресурсу ПМТ. Цей метод дає змогу дистанційно і оперативно контролювати стан системи захисту від корозії на різних ділянках ПМТ, а також виявляти пошкодження ізоляції [9].

Важливою у цьому контексті є процедура коректного оцінювання інформативних електрофізичних параметрів, які характеризують вплив ґрунтового середовища та умов катодного захисту на густину корозійного струму у дефектах.

Формулювання задачі. Розглядаємо ділянку труби з конструкційної сталі (зокрема, 17Г1С). Зовні труби є ґрунт (обмежуємось розглядом вологого ґрунту (глини), характеристики якого близькі до модельного електроліту NACE). Трубу і ґрунтовий електроліт моделюємо суцільними середовищами. ПМТ знаходиться в умовах катодного захисту, для якого поляризаційний потенціал повинен знаходитись у межах від $-0,85$ до $-1,15$ V відносно мідносльфатного електрода порівняння. Всередині труби є потік газу. Для магістрального газопроводу задають внутрішній тиск газу p , який знаходиться в межах $5...7,4$ МПа. На межі металу з ґрунтовим електролітом знаходиться система поверхневих корозійних дефектів (каверн, тріщин, виразок, пітингів). Обмежуємось підходом найслабшої ланки (каверна h , у вершині якої заходить тріщина c , загальна глибина дефекту $h_d = h + c$) [1]. Тріщина росте за пружно-пластичним механізмом в умовах електрохімічної корозії і може досягнути максимальної глибини c_{th} , якій відповідає руйнування труби. Тут глибина каверни h_{th} , порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) $K_1 = K_{th}$ [2].

Об'єкт дослідження – корозійні струми у поверхневому дефекті на межі між металом сталевого трубопроводу і ґрунтовим електролітом.

Необхідно проаналізувати взаємозв'язки корозійних струмів у металі ПМТ з механічними параметрами на основі макроскопічних співвідношень механіки руйнування та фізики поверхні і їх використати для діагностування відповідних фізичних процесів на межі розділу метал–ґрунтовий електроліт.

Мета роботи – вибрати і опрацювати інформативні параметри, щоб контролювати корозійний процес у дефекті на поверхні трубопроводу з урахуванням КЗ і внутрішнього тиску, а також оцінювати тривалість простою (відключення) КЗ. Тобто розробити методика розрахунку фізичних величин, які характеризують кінетику поширення зовнішньої корозійної тріщини у стінці підземного газопроводу, з урахуванням заданого внутрішнього тиску і катодного захисту. У цьому контексті доцільно оцінити ресурс підземної металоконструкції з урахуванням інформації про термін експлуатації ПМТ, електричні струми, поляризаційні потенціали, деформації та механічні напруження.

Моделювання процесів у складних системах за допомогою нейронних мереж. У результаті аналізу статистичних даних встановлено, що найприйнятніший для більшості завдань щодо відбору комплексів параметрів та оцінювання технічного стану ПМТ є багатошарові нейронні мережі, які тренуються за алгоритмом зворотного поширення помилки Левенберга–Марквардта [10]. Здебільшого найоптимальнішою є класична архітектура багатошарової нейронної мережі [11, 12] зі зворотним поширенням помилки.

Модель діагностування підземних металоконструкцій. Розглянемо на зовнішній поверхні ПМТ каверну глибини h із тріщиною у вершині глибини c

($h_d = h + c$) (рис. 1) [4]. Товщина стінки труби d , діаметр D . Внутрішній тиск газу p призводить до кільцевих σ_θ , поздовжніх σ_z , радіальних σ_r напружень. Зовнішня поверхня труби контактує з ґрунтовим електролітом.

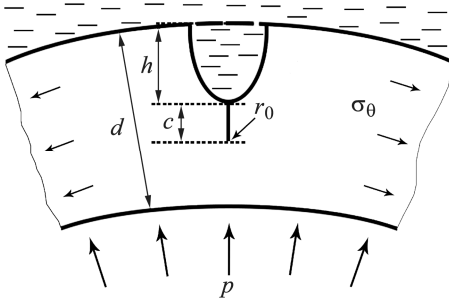


Рис. 1. Труба з корозійною каверною і тріщиною в електроліті.

Fig. 1. Pipe with a corrosion cavity and a crack in the electrolyte.

Для оцінювання густини корозійного струму j_C у вершині тріщини і швидкості поширення вершини V_C цієї тріщини в металі використовуємо відомі співвідношення [1, 5, 13]:

$$j_C = \frac{\beta \cdot \chi \cdot \Delta\psi}{\delta \cdot \ln((c+h)/\delta)},$$

$$V_C = \frac{dc}{dt} = A(E_a) \sqrt{\frac{1}{c} \left(1 - \left(\frac{c}{h_0} \right)^\theta \right)}, \quad (1)$$

де β – кут у вершині тріщини; χ – електропровідність ґрунтового електроліту; $\Delta\psi$ – омичне зниження потенціалу у вершині тріщини; c , δ – глибина і розкриття тріщини відповідно ($c + h > \delta$); E_a – енергія активації реакції розчинення металу; $A(E_a)$, h_0 , θ – фізичні параметри, теоретичне подання яких наведено у праці [5]. Раніше наведено [6, 7, 14] числові оцінки $\Delta\psi$ для різних варіантів радіуса кривизни вершини тріщини і відповідний діапазон $\Delta\psi \approx 0,2 \dots 13,2$ mV. Швидкості поширення вершини корозійної тріщини $V_C = 1$ mm/year відповідає еквівалентне значення густини корозійного струму $j_C = 0,8616$ A/m² у її вершині.

Розглянемо два етапи росту каверни і тріщини. Перший починається за відсутності дефекту ($h_d = h + c = 0$) і завершується, коли тріщина досягне глибини c_{pl} ($h_d = h_{pl} = h + c_{pl}$). При цьому в околі вершини тріщини механічні напруження досягають стану пластичного течіння, згідно з критерієм Губера–Мізеса–Генкі [14, 15]:

$$\sigma_\theta^2 + \sigma_z^2 - \sigma_\theta \cdot \sigma_z = \sigma_T^2, \quad (2)$$

Тут σ_T – границя плинності матеріалу труби, Pa. Вважаємо, що радіальні напруження σ_r незначні порівняно з кільцевими та меридіональними.

Уведемо в розгляд коефіцієнт запасу міцності $k_{cs} = \sigma_B / \sigma_{\theta*} = 1,3$. Тут σ_B – границя міцності металу; $\sigma_{\theta*}$ – напруження, якому відповідає допустима (для даного k_{cs}) глибина дефекту $h_d = h_{cr} = h + c_{cr}$. Другий етап відповідає зміні довжини тріщини c в діапазоні від c_{pl} до c_{cr} (тобто $h_d = h_{pl} + h_{cr}$, $c_{cr} < c_{th}$).

За критерії руйнування труби приймаємо критерій Гріффітса–Ірвіна–Орвана і умову Ірвіна для КІН K_I [14, 16]:

$$\sigma_* = \sqrt{\frac{2E \cdot WPL}{\pi \cdot L_T (1 - \nu^2)}}, \quad K_{1C} = \sqrt{\frac{2E \cdot WPL}{1 - \nu^2}}, \quad K_I = K_{1C}. \quad (3)$$

Тут перші дві формули записані для плоскої деформації; E , ν – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона відповідно; σ_* – критичне напруження (зокрема, відповідне границі міцності σ_B), Pa; WPL – поверхнева енергія пластичного деформування, J/m²; K_{1C} – в'язкість руйнування матеріалу, Pa/m^{1/2}; L_T – довжина дефекту (каверни), m; $WPL = J/2$; J – інтеграл Райса [17].

Коефіцієнт інтенсивності напружень K_I зв'яжемо з розкриттям тріщини δ_1 і його критичним значенням δ_{1C} та перенапруженням η реакції розчинення металу за допомогою співвідношень, аналогічних [1, 14, 16]:

$$K_1 = K_{ISCC} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2} \cdot (2 \cdot WPL - z_i F \rho \delta_1 \frac{\eta}{M} \cdot f(j_c, T))},$$

$$K_1 = K_{IC} = \sqrt{E \cdot \sigma_T \cdot \delta_{IC}}. \quad (4)$$

Тут z_i – формальний заряд сольватованих (гідратованих) йонів; $F = 96485$ C/mol – стала Фарадея; ρ – густина матеріалу, kg/m³; M – молекулярна маса металу, kg/mol ($M = 0,05585$ kg/mol – для сталі); K_{ISCC} – порогове значення КІН, тобто мінімальне значення, що відповідає початку поширення тріщини за впливу сумісної дії механічного навантаження і корозивного середовища, Pa/m^{1/2}; η – електрохімічне перенапруження, тобто відхилення електродного потенціалу від його рівноважного (стосовно приелектродного складу розчину) термодинамічного значення під час поляризації електрода за впливу струму, V; $f(j_c, T)$ – функціонал зв'язку між K_{IC} , K_{ISCC} і η ; j_c – густина струму корозії, A/m²; T – температура, К.

Граничне значення $\delta_1 = \delta_{IC}$ входить у критерій міцності (критичного розкриття тріщини), що визначає гранично рівноважний стан пружно-пластичного тіла (труби) на момент досягнення тріщиною розкриття δ_{IC} , якому відповідає певне значення K_{IC} і поверхнева енергія пластичного деформування WPL [14, 16]:

$$\delta_1(L_T, \sigma_T) = \delta_{IC}, \quad \delta_1 = 2 \cdot WPL / \sigma_T. \quad (5)$$

Оскільки $\sigma_B > \sigma_T$, то за умови заданого експлуатаційного внутрішнього тиску p тріщина поширюватиметься, поки не буде виконана умова Ірвіна $K_1 = K_{IC}$ (критерій руйнування труби) (3) [14].

Термін безаварійної експлуатації трубопроводу T_S (тобто ресурс) можна оцінити за формулою, аналогічною [14]:

$$T_S = (h_{ch} - h_C) / V_C = T_{S1} + T_{S2}, \quad (6)$$

де $h = h_C$ – геометричний розмір каверни; T_{S1} – термін попередньої експлуатації ПМТ (початкове значення, яке задають).

Результати експерименту та розрахунків. Співвідношення (1)–(6) використовуємо для оцінювання часу T_S (ресурсу) ділянки трубопроводу з корозійним дефектом на зовнішній поверхні (див. рис. 1), для якої виміряли струми і потенціали за допомогою БВС та вимірювача поляризаційного потенціалу за відомою експериментальною методикою, елементи якої подано раніше [3, 9]. Оскільки значення T_{S1} відомо (задано), то оцінювання ресурсу пов'язано із розрахунком T_{S2} . Розмірний ефект міцності під час визначення компонент σ_θ , σ_z , σ_r враховано, як у працях [1, 5], оскільки h , c , d малі порівняно з D .

Подано (рис. 2) графік результатів вимірювань за методикою [9] електричного струму катодного захисту $I(x)$, густини струму КЗ $j_n = j_{cp}$, коефіцієнта гармоніки k_n та поляризаційного потенціалу U_p на ділянці підземного газопроводу завдовжки L ($0 \leq x \leq L$, $L = 40$ m).

Уважаємо, що дефект розміщений на ділянці трубопроводу, де густина струму максимальна $j_n = 5,6$ mA/m² ($x = 8$ m). Розглядаємо дефект типу каверни (пітинга) завглибшки $h = 4,3$ mm, у вершині якої корозійна тріщина (див. рис. 1). Дефект відповідає тривалості експлуатації $T_{S1} = 43$ years і усередненій (експериментально встановленій) густині корозійного струму

$$j_c = j_{tr} = 0,0732 \text{ A/m}^2 \text{ (тобто } V_{c*} = 0,085 \text{ mm/year)}.$$

Для уточнення умов розвитку тріщини в часі використовуємо результати експерименту для оцінювання впливу механічних напружень $\sigma = \sigma_\theta$ у вершині корозійної тріщини на густина корозійного струму $j_c(\sigma)$ на зовнішній поверхні труби [18] (табл. 1 і 2).

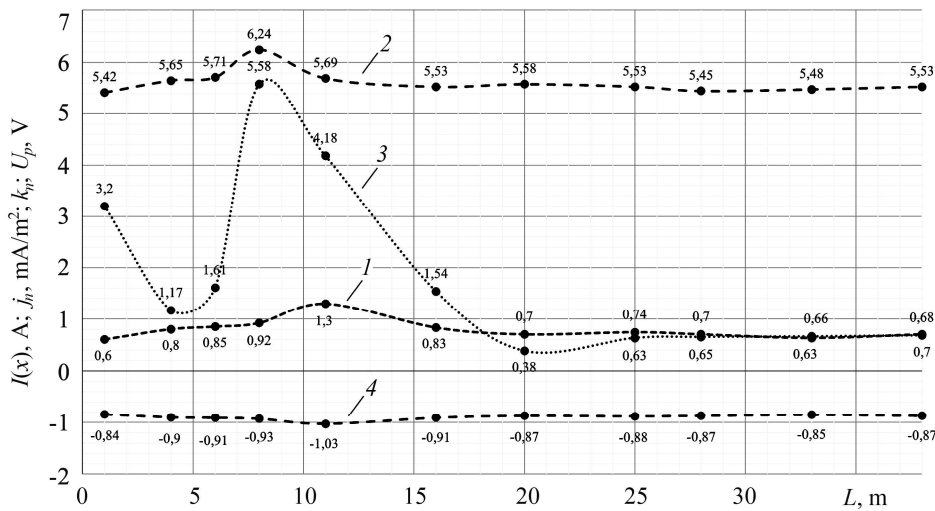


Рис. 2. Графік результатів вимірювань струмів $I(x)$ (1), коефіцієнта гармоніки k_n (2), густини струму j_n (3) та поляризаційного потенціалу U_p (4) на ділянці підземного трубопроводу довжиною L ($0 \leq x \leq L$, $L = 40$ m).

Fig. 2. Result of measurement of currents $I(x)$ (1) and harmonic coefficient k_n (2), as well as current density j_n (3), and polarization potential U_p (4) in the area of underground metal pipeline of length L ($0 \leq x \leq L$, $L = 40$ m).

Таблиця 1. Інформація для оцінювання густини j_c корозійного струму на поверхні труби залежно від механічного напруження σ [18]

σ	$\sigma = 0$	$\sigma = 0,6\sigma_T$	$\sigma = 0,95\sigma_T$	$j_c(\sigma) = B_1(\sigma) \cdot j_{tr} + B_2(\sigma)$, $j_{tr} = 0,0732 \text{ A/m}^2$ у глині
B_1	0,18	0,36	0,58	
$B_2, \text{ A/m}^2$	0,01	0,013	0,015	
$j_c, \text{ A/m}^2$	0,0232	0,0393	0,0575	

Таблиця 2. Інформація для оцінювання густини j_c корозійного струму на поверхні труби з урахуванням струму катодного захисту j_{cp} [18]

j_{cp}/j_{tr}	1	3	5
$V_c, \text{ mm/year}$	0,027	0,005	0,001
$j_c, \text{ A/m}^2$	0,0233	0,0043	0,00086

Результатам табл. 1 відповідає залежність густини j_c корозійного струму від кільцевого напруження $\sigma = \sigma_\theta$ у вершині тріщини [18]:

$$j_c(\sigma) = B_1(\sigma) \cdot j_{tr} + B_2(\sigma) . \quad (7)$$

У табл. 1 та формулі (7) $B_1(\sigma)$ – безрозмірний коефіцієнт; j_{tr} – густина граничного струму кисню, виміряного у ґрунті (глині) на рівні укладання трубопроводу (j_{tr} – це фактично густина струму аерації, який забезпечує транспортування кисню зі сторони ґрунту до поверхні трубопроводу) [18].

Для визначення K_{1C} використаємо емпіричне співвідношення [19]:

$$K_{1C} = \sqrt{KD \cdot KCV} , \quad (8)$$

де $KD = 2,1978 \cdot 10^{10}$ Ра – коефіцієнт пропорційності; KCV – ударна в'язкість, J/m^2 . Врахуємо, що ділянка труби знаходилась на віддалі $L = 5$ km від компресорної станції і для неї початкове значення $KCV = 730 \text{ kJ/m}^2$ [20]. Упродовж $T_{51} = 43$ years

ударна в'язкість зменшилась на 38,3% і становила $KCV_* = 450,6 \text{ kJ/m}^2$ [20]. Аналогічне зменшення врахуємо для даних на рис. 2. В результаті для КІН K_{1C} на основі співвідношення (8) з урахуванням тривалості деградації сталі $T_d = 43 \text{ years}$ отримаємо $K_{1C} = 84,1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Середня густина корозійного струму у каверні, яка відповідає усередненій швидкості поширення тріщини упродовж цих років, $V_{c0} = 0,1 \text{ mm/year}$ ($h = 43 \cdot V_{c0} = 4,3 \text{ mm}$). Також слід врахувати, що $\approx 30\text{...}40\%$ часу КЗ підземного трубопроводу був вимкнугий [18].

Отримані результати експерименту (рис. 2, табл. 1 і 2) і співвідношення (1)–(8) використаємо для оцінювання T_{S2} , якщо характеристики матеріалу труби відповідають сталі 17Г1С [1–5]:

$$\begin{aligned} T &= 293 \text{ K}; \quad K_{ISCC} = 66,6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}; \quad K_{1C} = 84,1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}; \quad \nu = 0,3; \\ E &= 213 \text{ GPa}; \quad \rho = 7850 \text{ kg/m}^3; \quad D = 1,22 \text{ m}; \quad d = 14 \text{ mm}; \quad h = 4,3 \text{ mm}; \\ \chi &= 6,0 \text{ }(\Omega\cdot\text{m})^{-1}; \quad \beta = 5^\circ \text{ }(\beta = 0,087 \text{ rad}); \quad \sigma_T = 343 \text{ MPa}; \quad \sigma_B = 510 \text{ MPa}; \\ M &= 0,0558 \text{ kg/mol}; \quad p = 5,5 \text{ MPa}; \quad R = 8,314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Тут χ – електропровідність електроліту, який аналогічний вологій глині.

Враховуючи співвідношення (1)–(8) і числові дані (9), за допомогою методики, в основі якої нейронна мережа [12], отримали:

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta*} &= 392 \text{ MPa} = 0,769 \cdot \sigma_B; \quad \sigma_{z*} = 118 \text{ MPa}; \quad h_{cr} = 6,0 \text{ mm}; \\ j_c &= 0,0743 \text{ A/m}^2; \quad c_{cr} = 1,7 \text{ mm}; \quad T_{S2} = 17,4 \text{ years}, \end{aligned} \quad (10)$$

де σ_{z*} – критичне значення поздовжнього напруження σ_z .

Одержані результати для струмів і потенціалів (рис. 2) оптимізували за допомогою нейронної мережі, критерію якості та алгоритму зворотного поширення [12, 21]. Необхідно відзначити, що результати вимірів струму нормалізовані. Також застосовано систему підтримки прийняття рішень, яка відкидає неправильні (фізично необґрунтовані) виміри [21, 22].

На основі табл. 1 і 2 для $\sigma_{\theta*}$ у вершині тріщини одержали $j_c = 0,0743 \text{ A/m}^2$. З урахуванням експериментально визначеного розкриття тріщини для сталі 17Г1С $\delta_* = 1,53 \text{ mm}$ [23] j_{c0} і співвідношень (1), (4) отримали омичне зниження потенціалу у вершині тріщини $\Delta\psi_* = 20\text{...}22,7 \text{ mV}$, що близько до діапазону $\Delta\psi \sim \sim 0,2\text{...}13,2 \text{ mV}$, обчисленого теоретично у працях [6, 13]. Похибки оцінювання $\Delta\psi_*$ не перевищують 20%.

Використано експериментально встановлене значення електрохімічного перенапруження реакції анодного розчинення металу (сталі) у вершині тріщини ($\eta = 612 \text{ mV}$ [24]), яке відповідає густині корозійного струму, а також $\delta_* = 1,53 \text{ mm}$, співвідношення (4) і числові дані (9), (10), для оцінювання функціонала $f(j_c, T)$. Встановлено, що $f(j_c, T) = 0,00106$.

Проаналізувавши період $T_{S1} = 43 \text{ years}$, встановили (з урахуванням відомих експериментальних результатів), що за умови катодного захисту початкове значення густини корозійного струму для сталі 17Г1С у розчині ґрунтового електроліту становить $j_{c0} = 0,023 \text{ A/m}^2$, якщо зовнішнє середовище глина і відсутні механічні напруження (внутрішній тиск у газопроводі). Ця інформація корелює з аналогічними результатами праці [18], зокрема, з даними табл. 2.

На основі розрахунків з урахуванням $j_{c0} = 0,023 \text{ A/m}^2$, співвідношень (1)–(10) та інформації в табл. 1 і 2 встановлено, що за попередні 43 years (T_{S1}) впродовж $T_{S11} = 16,2 \text{ years}$ КЗ був вимкнений. Тут врахували, що трубопровід весь час (упродовж T_{S1}) знаходився в умовах внутрішнього гідростатичного тиску $p = 5,5 \text{ MPa}$.

Результати розрахунку механічних напружень σ у вершині дефекту, густини корозійного струму j_c , а також омичного зниження потенціалу (стрибка) $\Delta\psi$ між анодною і катодною ділянками у вершині корозійної тріщини для трьох характерних ситуацій наведено у табл. 3.

Таблиця 3. Результати розрахунку механічних напружень σ у вершині дефекту, густини корозійного струму j_c , а також омичного зниження потенціалу $\Delta\psi$

$h + c$, mm	σ , MPa	V_c , mm/year	j_c , A/m ²	$\Delta\psi$	η	$f(j, T)$
				mV		
0	240	0,0558	0,0481	–	589	$0,917 \cdot 10^{-3}$
4,3	349	0,0776	0,0669	20,0	616	$1,102 \cdot 10^{-3}$
6,0	392	0,0862	0,0743	22,7	612	$1,062 \cdot 10^{-3}$

Порівняємо $\Delta\psi_*$, η і отримаємо їх співвідношення $\Delta\psi_*/\eta = 0,032...0,037$.

Якщо припустити, що внутрішній тиск у трубі відсутній, то з урахуванням результатів (табл. 2), отримаємо уявний ресурс труби $T_{S2*} = 63$ years, що у 3,6 рази більший порівняно з T_{S2} (10). В цьому випадку напруження $\sigma = \sigma_\theta$ змінюється у діапазоні 349...392 МПа, тобто зростає на 12%, а струм j_c на 11%.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що внаслідок впливу механічних напружень на поширення корозійної тріщини у стінці підземного трубопроводу, викликаних дією внутрішнього гідростатичного тиску, його ресурс зменшується у 3,6 рази порівняно з режимом, коли внутрішній тиск близький до атмосферного. Кінетика розвитку корозійної тріщини на зовнішній поверхні трубопроводу залежить від густини j_c корозійного струму у її вершині та пов'язана зі струмом j_{cp} КЗ і струмом j_{ir} аерації, який забезпечує транспортування кисню зі сторони ґрунту до поверхні металу. Запропонована розрахункова методика ефективна для прогнозування залишкового ресурсу трубопроводу та оцінювання діапазонів зміни фізичних параметрів, які характеризують механізми поширення корозійної тріщини за катодного захисту. З урахуванням відомого експериментально визначеного розкриття тріщини для сталі 17Г1С δ_* і густини j_c корозійного струму розраховано діапазон зміни омичного зниження потенціалу у вершині тріщини $\Delta\psi_* \approx 20...23$ mV, що близький до діапазону $\Delta\psi \approx 0,2...13,2$ mV, який раніше отримано теоретично для тріщини з еліптичним профілем. Також встановлено, що електрохімічне перенапруження η реакції анодного розчинення металу (сталі) у вершині тріщини більше омичного зниження потенціалу $\Delta\psi_* \approx$ в 30 разів.

1. Джала Р., Юзевич В. Моделювання корозійних струмів металу з поверхневим дефектом // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – Спецвип. № 11. – С. 47–50.
2. Nazarchuk Z. T., Nykyforchyn H. M. Structural and corrosion fracture mechanics as components of the physicochemical mechanics of materials // Materials Science. – 2018. – **54**, № 1. – P. 7–21.
(Назарчук З. Т., Никифорчин Г. М. Структурна та корозійна механіка руйнування як складові фізико-хімічної механіки матеріалів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 1. – С. 17–30.)
3. Detection of specific features in the functioning of a system for the anti-corrosion protection of underground pipelines at oil and gas enterprises using neural networks / V. Lozovan, R. Dzhalala, R. Skrynkovskyy, V. Yuzevych // Eastern-European J. of Enterprise Techn. – 2019. – **1**, № 5 (97). – P. 20–27. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154999>.
4. Qualimetric analysis of pipelines with corrosion surfaces in the monitoring system of oil and gas enterprises / V. Yuzevych, N. Pavlenchuk, O. Zaiats, N. Heorhiadi, V. Lakiza // Int. J. of Recent Techn. and Eng. – 2020. – **9**, № 1. – P. 1145–1150. DOI: [10.35940/ijrte.A1341.059120](https://doi.org/10.35940/ijrte.A1341.059120).
5. Cherepanov G. P. Mechanics of Brittle Fracture. – New York: McGraw Hill, 1979. – 950 p.
6. Stashchuk M. H. Stress-induced cathodic and anodic regions on the boundary between an elliptic hole and a medium // Materials Science. – 2011. – **46**, № 4. – P. 493–504.
(Стащук М. Г. Катодні та анодні ділянки, зінційовані напруженнями на межі еліптичного отвору зі середовищем // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – **46**, № 4. – С. 60–68.)
7. Stashchuk M. H. Corrosion currents in the cathodic and anodic sections of a circular stress concentrator // Materials Science. – 2013. – **49**, № 3. – P. 386–393.

- (Стацук М. Г. Корозійні струми на катодних та анодних ділянках кругового концентратора напружень // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – **49**, № 3. – С. 96–101.)
8. *Gas pipeline incidents* // 9th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group. – 2015. – Doc. Number EGIG 14.R.0403. – 61 p. DOI: <https://www.egig.eu/>.
 9. *New methods for the corrosion monitoring of underground pipelines according to the measurements of currents and potentials* / R. M. Dzhala, B. Ya. Verbenets', M. I. Mel'nyk, O. M. Semenyuk // *Materials Science*. – 2017. – **53**, № 5. – P. 732–741.
(Нові методи контролю корозії підземних трубопроводів за вимірами струмів та потенціалів / Р. М. Джала, Б. Я. Вербенець, М. І. Мельник, А. Б. Мицик, Р. С. Савула, О. М. Семенюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **53**, № 5. – С. 115–123.)
 10. *Wasserman P. Neural computing: theory and practice*. – 1989. DOI: <https://doi.org/10.5860/choice.27-1569>.
 11. *Artificial neural networks used in optimization problems* / G. Villarrubia, J. F. De Paz, P. Chamoso, and F. De la Prieta // *Neurocomputing*. – 2018. – **272**. – P. 10–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.04.075>
 12. *Forming the toolset for development of a system to control quality of operation of underground pipelines by oil and gas enterprises with the use of neural networks* / V. Lozovan, R. Skrynkovskyu, V. Yuzevych, M. Yasynskyi, G. Pawlowski // *Eastern-European J. of Enterprise Techn.* – 2019. – **2**, № 5 (98). – P. 41–48. DOI: <https://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2019.161484>
 13. *Kaeshe H. Die Korrosion der Metalle. Physikalisch-chemische Prinzipien und aktuelle Probleme*. – Berlin-Heidenberg-New York: Springer-Verlag, 1979. – 400 p.
 14. *Yuzevych L., Skrynkovskyu R., and Koman B. Development of information support of quality management of underground pipelines* // *EUREKA: Phys. Sci. and Eng.* – 2017. – № 4. – P. 49–60. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2017.00392>.
 15. *Vanabic D. Plastic Behaviour Sheet Metal. Chapter 2. // Sheet Metal Forming Processes*. – Berlin-Heidelberg: Springer, 2010. – P. 27–140.
 16. *Панасюк В. В., Андрейків А. Е., Партон В. З. Основы механики разрушения*. – К.: Наук. думка, 1988. – 488 с.
 17. *Rice J. R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks* // *J Appl. Mech.* – 1968. – **35**. – P. 379–386.
 18. *Khizhnyakov V. I., Negodin A. V., and Kalinichenko V. S. Determination of the danger of formation and growth of corrosion and stress-corrosion defects based on the analysis of cathodic protection modes of main gas and oil pipelines* // *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Constructions*. – 2018. – **20**, № 5. – P. 128–139.
 19. *Гарантирована прочність труби с трещинами поперечного растрескивания под напряжением* / М. В. Закирьянов, Б. С. Файзуллин, Г. Е. Коробков, М. В. Чучкалов // *Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов баз и хранилищ*. – 2019. – **1**, № 117. – С. 72–81.
 20. *Деградація властивостей сталей магістральних газопроводів упродовж їх сорокарічної експлуатації* / Г. М. Никифорчин, О. Т. Цирульник, Д. Ю. Петрина, М. І. Греділь // *Пробл. прочности*. – 2009. – № 5. – С. 66–72.
 21. *Improving the diagnostics of underground pipelines at oil-and-gas enterprises based on determining hydrogen exponent (PH) of the soil media applying neural networks* / L. Yuzevych, R. Skrynkovskyu, V. Yuzevych, V. Lozovan, G. Pawlowski, M. Yasynskyi, I. Ogirko // *Eastern-European J. of Enterprise Techn.* – 2019. – **4**, № 5 (100). – P. 56–64. DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174488>.
 22. *Improvement of the toolset for diagnosing underground pipelines of oil and gas enterprises considering changes in internal working pressure* / L. Yuzevych, L. Yankovska, L. Sopilnyk, V. Yuzevych, R. Skrynkovskyu, B. Koman, M. Yasynskyi // *Eastern-European J. of Enterprise Techn.* – 2019. – **6**, № 5 (102). – P. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184247>.
 23. *Determination of the parameters of crack resistance for 17G1S steel under transverse shear* / Ya. L. Ivanyts'kyi, S. T. Shtayura, T. M. Lenkovs'kyi, and Yu. V. Mol'kov // *Materials Science*. – 2014. – **49**, № 5. – P. 637–643.
(Визначення характеристик тріщинозійності сталі 17Г1С за поперечного зсуву / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, Т. М. Ленковський, Ю. В. Мольков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – **49**, № 5. – С. 73–78.)
 24. *Angal R. D. Principles and Prevention of Corrosion*. – New York: Alpha Sci. Int. Ltd., 2010. – 276 p.

Одержано 05.04.2021